



Développement de méthodologies d'Eco-conception pour le secteur microélectronique

Aurélie Villard

► To cite this version:

Aurélie Villard. Développement de méthodologies d'Eco-conception pour le secteur microélectronique. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENI101 . tel-00993718

HAL Id: tel-00993718

<https://theses.hal.science/tel-00993718>

Submitted on 20 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Aurélie VILLARD

Thèse dirigée par **Daniel BRISSAUD**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**

dans l'**École Doctorale IMEP-2**

Développement de méthodologies d'éco-conception pour le secteur microélectronique

Thèse soutenue publiquement le **21 Décembre 2012**,
devant le jury composé de :

M. Lionel ROUCOULES

Professeur, Arts et Métiers Paristech

Mme Valérie LAFOREST

Professeur, Ecole des Mines de Saint-Etienne

M. Olivier BONNAUD,

Professeur, Université de Rennes 1

M. Pierre JACQUEMIER

Directeur Environnement, STMicroelectronics

M. Serge TICHKIEWITCH

Professeur, Université de Grenoble

M. Daniel BRISSAUD

Professeur, Université de Grenoble, Directeur de thèse



Résumé / Abstract

L'éco-conception est un processus permettant aux entreprises industrielles d'assumer leur responsabilité relative aux impacts générés par leurs produits. Les contraintes liées aux impacts environnementaux sont intégrées dans les stades avancés de la conception. Du fait de ses spécificités, tant au niveau de la structure du produit que de la complexité des processus de conception, l'industrie microélectronique s'est trouvée jusqu'alors en marge de considérations avancées sur l'impact de ses produits. L'objectif du travail de recherche est de définir une méthodologie d'éco-conception dédiée à la microélectronique permettant d'identifier les méthodes, outils et indicateurs susceptibles d'être déployés dans les départements de R&D. La stratégie associée vise à accroître la sensibilité environnementale des concepteurs et à les conduire à trouver des alternatives influant positivement sur l'environnement.

Notre méthodologie repose sur une plateforme méthodologique intégrant plusieurs outils, chacun dédié à une activité indépendante de la conception de produits microélectroniques. L'évaluation environnementale est basée sur l'analyse de cycle de vie (ACV). Dans les phases préliminaires de conception, la connaissance du produit (structure, propriétés et performances) est limitée, alors la modélisation de son cycle de vie est réalisée à l'aide « d'ACV-simplifiée » : cela consiste à prédire l'impact d'un produit en développement grâce à des mécanismes d'adaptation par analogie basés sur l'étude des générations précédentes.

En plus de solutions techniques appropriées, l'intégration de l'éco-conception dans une entreprise nécessite des changements organisationnels : une modification du processus de conception est proposée ainsi que des recommandations pour l'intégration d'un système de gestion de l'environnement orienté sur les produits.

Mots clés : éco-conception ; industrie microélectronique ; analyse de cycle de vie ; système de gestion de l'environnement orienté produit

Eco-design represents a natural process for industries wishing to fulfil their role in safeguarding environment and resources. The constraint linked to impacts becomes a decisive factor which can be systematically integrated in the early stages of products development. Because of chips specificities, both in structure and complexity of design process, microelectronic industry has been up to now out of advanced considerations related to chips environmental performances. Our target was to define an eco-design methodology dedicated to microelectronic sector including the identification of methods, tools and indicators which have the highest chance to be deployed in R&D departments. The strategy aims to increase designers' environmental consciousness and drive them to explore innovative opportunities that can positively impact the environment during design phase.

Our methodology relies on a platform integrating three tools, each one of them dedicated to a part of chip design. Environmental analysis is based on Life Cycle Assessment (LCA). In the preliminary stages of design, knowledge on product (structure, properties and performances) is limited so the evaluation is assessed using "Quick LCA": it consists in predicting the environmental footprint of an under-development product thanks to adaptive mechanism based on the evaluation of previous generations.

In addition to technical solutions, an optimized integration of an innovative process such as eco-design requires organizational changes into the company: a proposal for internal design process modification was done including recommendations for integration of a product-oriented management system.

Key words: eco-design; microelectronic industry; life cycle assessment; product-oriented environmental management system.

Remerciements

Je remercie tout d'abord :

- M. Lionel Roucoules, Professeur des Arts et Métiers d'Aix en Provence et Mme Valérie Laforest, Professeur à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne pour avoir accepté de relire et juger ces travaux de thèse.
- M. Olivier Bonnaud, Professeur de l'Université de Rennes et Président du CNFM et M. Serge Tichkiewitch, Professeur Emérite de l'Université de Grenoble, pour avoir accepté d'être membres du jury en tant qu'examinateurs.

Je remercie les personnes qui m'ont permis de réaliser ces travaux de recherche :

- Daniel Brissaud, Professeur à l'Université de Grenoble, pour avoir dirigé ma thèse au sein du laboratoire G-SCOP. Je me souviens du jour où vous m'aviez dit « un directeur de thèse est surtout un catalyseur », mais en fait, j'ai surtout beaucoup appris en travaillant avec vous.
- Pierre Jacquemier, Directeur Environnement du Corporate Sustainable Development de STMicroelectronics. Merci d'avoir encadré mon stage puis ma thèse, de m'avoir suivi puis au final d'avoir lu le manuscrit. Depuis le jour où je suis arrivée à ST, je pense avoir bien changé. Vos conseils ont largement contribué à ce changement et m'ont permis d'acquérir l'assurance, la maîtrise et l'expérience nécessaires à l'aboutissement de ce projet.
- Alain Denielle, Directeur du Corporate Sustainable Development de STMicroelectronics. Je vous remercie d'avoir crû en ce projet puis de m'avoir soutenue pendant quatre ans.
- Marc Mantelli de Technology R&D du site de Rousset de STMicroelectronics. C'est très chaleureusement que je te remercie pour ton aide, tes connaissances, ta patience : j'ai vraiment apprécié de travailler avec toi et je crois que l'on a appris chacun l'un de l'autre.

Je tiens à remercier les membres du laboratoire G-SCOP et particulièrement:

- Alan Lelah, pour l'aide que tu m'as apportée. J'ai beaucoup apprécié nos échanges et ton regard critique sur mes travaux.
- Ingwild Baudry. De nos thèses jumelles, nous avons eu deux projets très différents. Je te remercie pour cette collaboration « de loin » mais régulière qui nous a permis à chacune d'avancer sans jamais se heurter. Je te remercie pour ton soutien pendant ces trois années!
- Lucie Domingo, pour tes idées, tes conseils, ton dynamisme et tes compétences. Travailler avec toi est un véritable plaisir.

Je remercie aussi l'équipe de Technology R&D du site de Rousset de STMicroelectronics:

- Jean-Michel Mirabel. Merci d'avoir soutenu le projet dès le début et de m'avoir accueilli dans votre équipe, vraiment très chaleureuse.
- Olivier Pizzuto. Je me suis souvent faite défiée pendant cette thèse, mais je reconnais que tu auras été le meilleur. Toutefois, cette pression a toujours été positive. Je suis contente qu'à la fin, le travail t'ait bluffé !

- L'ensemble du groupe de travail de Rousset. Tout a commencé ici, pourvu que vous repreniez la suite : pas d'excuse, grâce à vous, il y a un super outil ! Ainsi, je remercie et félicite Florent Seguin pour ces 5 mois de travail acharnés et admirables.

Et aussi :

- Thanks to my Italian colleagues, Monica Bianchi and Paolo Epigrafi, for THE "Eco-Design EXPERIENCE" in ST that we've lived together, which was not really easy sometimes...but we did it!
- Merci à Luc Petit et l'équipe de CPA Grenoble de ST pour leur aide : votre aide aura été précieuse et j'espère que l'outil arrivera un jour sur vos ordinateurs...
- Je remercie la société ST-Ericsson et tout particulièrement Pascal Roquet pour avoir donné une impulsion à des travaux qui auraient pu rester confidentiels des équipes de design.

Je ne peux, bien sûr, finir cette chaîne de remerciements sans faire parler le « moi » un peu plus personnel. C'est cette partie de moi, équilibrée et heureuse, qui m'a permis de m'accrocher à ce projet, d'y croire et de le trouver toujours plus intéressant.

Un énorme merci aux filles de l'équipe Corporate Responsibility de STMicroelectronics : Mélanie Salagnat, Charlotte Yvard, Julia Genovini, Estelle Hainry. Vous avez été géniales : d'un grand soutien à chaque moment, j'ai pris chacun de vos conseils au pied de la lettre car je savais que vous ne me vouliez que du bien et que vous croyiez vraiment à ce projet. Et parce que des rencontres au travail peuvent mener à de belles amitiés.

Merci aux copains de ST pendant ces trois années et surtout aux thésards (par ordre d'apparition) : Alexandre, Julien, Abdel, Emilie et Anthony. En trois ans, on en aura traversé des bons moments et des galères, et je suis contente que l'on se soit toujours soutenus etentraîdés. A tous : « c'est bientôt fini, courage ! ». Une pensée à la ribambelle de stagiaires, alternants et jeunes ingénieurs : trois générations passées dans l'open-space que l'on a accueillies tels des anciens. Un petit mot à mes co-voitureurs pour les tonnes de carbone non émises. Je salue mes collègues du G-SCOP, ce fut très agréable de partager avec vous quelques moments de convivialité : Hélène, Laura, Valérie, Damien, Safa, Jérémy...

Merci à mes amis pour m'avoir encouragée (et s'être un peu moqués du Doc-te-ur Villard) : Marine, Polly, Caro, Clem, Ice, Hélo, Fanny, Marco, Ben, Alexis, Pierrot, Djay, Schul... Tant pis je n'aurais pas soutenu le 12/12/12 mais vous étiez là quand même à chaque instant...

Merci à ma famille, qui je crois, n'a jamais vraiment su ce que je faisais : ce jour a été l'occasion de vous montrer ce travail dont je suis très fière et je le sais vous l'étiez également en me voyant, moi, la petite dernière, toute émue recevant ce diplôme. Merci à ma grand-mère, mes parents et ma sœur d'avoir été là à chaque moment. Et Jérôme, pour...tout. Tu m'as tant aidé pendant cette thèse (sans oublier les heures de tri sur ma biblio !), alors merci pour m'avoir si bien épaulé. Mais je crois qu'un merci n'est juste assez.

Nous y sommes. Sans l'expérience des uns, l'aide des autres, la patience de certains et le soutien de toutes les personnes citées ici, cette thèse aurait été différente et c'est pourquoi je tourne cette page sur un dernier Merci.

Sommaire

Résumé / Abstract	1
Remerciements	2
Sommaire	4
Liste des tableaux	10
Liste des figures	12
Acronymes	14
Introduction générale	15
PARTIE I : LOGIQUE DE L'ÉCO-CONCEPTION DANS LE SECTEUR MICROELECTRONIQUE	
Chapitre 1 : L'environnement, nouvelle dimension en conception	19
1. Produits industriels et environnement	19
1.1 Définitions et principes en éco-conception	19
1.2 Améliorer l'éco-efficacité	20
1.3 Notion de cycle de vie d'un produit	21
2. Analyse environnementale	23
2.1 Principe de l'Analyse de cycle de vie	23
2.2 Méthodologie pour la réalisation d'une ACV	24
2.3 Description des étapes facultatives en ACV	25
3. Conclusion du chapitre 1	28
Chapitre 2 : Eco-conception de produits microélectroniques	29
1. Produit microélectronique et environnement : interactions et spécificités	29
1.1 Fabrication	30
1.2 Utilisation	32
1.3 Distribution	33
1.4 Fin de vie	34
2. Tendances naturelles et feuilles de route en microélectronique : des effets naturellement positifs pour l'environnement ?	38
2.1 Effets de la miniaturisation	38
2.2 Réduction énergétique des circuits	40
2.3 Exemption de substances dangereuses et toxiques: application de la directive RoHS	40
3. Analyses des freins pour l'éco-conception d'un composant du fait de ses spécificités	41

3.1	Complexité de la fabrication et matérialisation secondaire	41
3.2	Taille du produit.....	42
3.3	Produits intermédiaires : variabilité des scenarios d'usage	42
4.	Conclusion du chapitre 2.....	43
Chapitre 3 : Quels enjeux pour un fabricant de composants ?		42
1.	Contexte de la thèse : programme d'éco-conception de STMicroelectronics	44
2.	Eco-conception en entreprise : réalité ou green-washing ?	45
3.	Les raisons de l'engagement d'une entreprise	46
3.1	Evolution des réglementations : mise en conformité et anticipation	47
3.2	Réaliser des bénéfices économiques et financiers	49
3.3	Développer un avantage compétitif	49
4.	Analyse des freins à l'intégration d'une culture d'éco-conception dans une entreprise microélectronique.....	50
4.1	Culture d'innovation dans un marché ultra-concurrentiel	50
4.2	Pas de solution alternative viable	51
4.3	Manque de standardisation pour le secteur microélectronique	51
5.	Conclusion du chapitre 3.....	52
Chapitre 4 : De la conception du produit microélectronique à l'éco-conception		53
1.	Description du processus de conception d'un produit microélectronique	53
1.1	Introduction à la modélisation classique d'un processus de conception industrielle ..	53
1.2	Deux concepts pour le succès de la conception d'un produit microélectronique	54
1.3	Schéma du processus de conception collaborative d'un produit microélectronique ..	56
1.4	Développement de technologies de fabrication de la puce	61
1.5	Développement du boîtier	62
1.6	Développement de procédés de fabrication	63
2.	Clés d'intégration de l'éco-conception dans l'entreprise	64
2.1	Intégration de l'environnement au processus existant de conception	64
2.2	Développer des supports méthodologiques de conception : méthodes et outils d'évaluation et d'aide à la conception environnementale adaptés au concepteur	65
2.3	Mise en place d'un système de management de l'éco-conception	66
3.	Analyse des freins pour l'éco-conception d'un produit microélectronique du fait de l'organisation de la conception dans l'entreprise.....	69
3.1	Complexité des mécanismes de conception.....	69
3.2	Conception multidisciplinaire : non trivialité de l'optimisation environnementale.....	70

4. Conclusion du chapitre 4.....	70
----------------------------------	----

Chapitre 5 : Enoncé de la problématique et question de recherche..... 72

1. Eco-conception d'un produit microélectronique : limites des méthodes et outils existants pour le contexte de la thèse.....	72
1.1 Niveaux d'éco-conception envisageables.....	72
1.2 Analyses de cycle de vie.....	72
1.3 Autres outils d'éco-conception.....	73
1.4 Revue de la littérature des méthodes proposées pour la microélectronique.....	73
1.5 Cohérence et limites des méthodologies dans le contexte de la thèse.....	76
2. Synthèse de la problématique.....	78
3. Méthodologie de recherche.....	79

PARTIE II : PROFIL ENVIRONNEMENTAL DU PRODUIT MICROELECTRONIQUE

Introduction à la partie II..... 82

Chapitre 6 : Méthode de réalisation d'un inventaire du cycle de vie pour un composant 84

1. Difficultés dans la réalisation de l'ICV pour la fabrication d'un composant.....	84
2. Approche pour la réalisation d'un ICV.....	84
2.1 Principe de l'approche <i>bottom-up</i>	84
2.2 Principe de l'approche <i>top-down</i>	85
2.3 Cohérence des deux approches et préconisation d'utilisation.....	86
2.4 Proposition pour l'inventaire de cycle de vie de la fabrication d'un composant quelconque : méthode hybride de collecte des données.....	88
3. Simplification de l'ICV par la segmentation de la phase de production.....	89
3.1 Description des technologies de fabrication et segmentation de la route.....	90
3.2 Simplification de la collecte par la segmentation de la route de fabrication.....	91
4. Conclusion de chapitre 6.....	94

Chapitre 7 : Sélection d'indicateurs pour l'industrie microélectronique..... 95

1. Etude du contexte : cartographie des interactions du secteur microélectronique avec l'environnement.....	96
1.1 Pressions extérieures.....	96
1.1 Responsabilités du secteur.....	96
1.2 Implications pour le profil d'un composant microélectronique.....	98
2. Impacts environnementaux des composants microélectroniques.....	99
2.1 Répartition des impacts sur les phases du cycle de vie.....	99

2.2	Phase de fabrication	99
2.3	Intégration dans une application électronique : distribution, utilisation et fin de vie 102	
3.	Points faibles environnementaux et principaux contributeurs	103
3.1	Lier les principaux leviers aux impacts les plus significatifs.....	103
3.2	Sélection d'indicateurs adaptés: quelques suggestions	104
4.	Localisation des impacts	108
5.	Résumé et conclusion du chapitre 7	110
Chapitre 8 : Méthode de caractérisation environnementale pour la microélectronique		110
1.	Caractérisation environnementale des matériaux utilisés pendant la fabrication	112
2.	Caractérisation environnementale des procédés de fabrication	115
3.	Caractérisation environnementale de la phase de fabrication d'un composant	117
3.1	Cahier des charges pour une méthode de caractérisation des technologies de fabrication	117
3.2	Méthode de caractérisation dans le cas de l'entreprise STMicroelectronics.....	120
4.	Conclusion du chapitre 8.....	124
Chapitre 9 : Modèle environnemental d'un produit microélectronique		126
1.	Evaluation environnementale d'un produit.....	126
1.1	Flux d'informations pour l'analyse environnementale.....	126
1.2	Evaluation environnementale d'un produit en conception : quelles limitations ?	128
2.	Evaluation et optimisation environnementale d'un produit en conception	128
2.1	Paramètres-clé du produit et responsabilités environnementales des concepteurs.	128
2.2	Définition du produit microélectronique éco-conçu	130
3.	Conclusion du chapitre 9.....	133
PARTIE III : INTEGRATION DE L'ECO-CONCEPTION DANS UNE ENTREPRISE MICROELECTRONIQUE		
Chapitre 10 : Green-ST, plateforme d'éco-conception de produits microélectroniques		135
1.	Etapes fondamentales du déploiement de la méthodologie	135
1.1	Cheval de Troie Méthodologique pour l'introduction de l'éco-conception dans les pratiques des concepteurs	135
1.2	Mesure de l'efficacité de l'intégration de la méthodologie.....	139
2.	Vecteurs d'intégration de l'environnement en conception de composants microélectroniques..	140
2.1	Identification des clés pour le déploiement, la duplication et l'industrialisation.....	140
2.2	Prérequis pour l'intégration d'un outil d'éco-conception	141

2.3	Objectifs stratégiques de la méthodologie	148
2.4	Outils et méthodes utilisés	149
2.5	Synthèse des attentes des utilisateurs vis à vis des supports méthodologiques	150
3.	Schéma de la méthodologie d'éco-conception intégrée à la plateforme <i>Green-ST</i>	151
3.1	Principes utilisés pour déterminer les impacts environnementaux d'objets en conception	151
3.2	Modification du déroulement de la conception et nouveau processus de développement d'un produit	156
3.3	Cadre de la méthodologie	156
3.4	Fonctionnement de la plateforme et articulation outils	157
Chapitre 11 : Description des outils d'éco-conception de la plateforme <i>Green-ST</i>		160
1.	<i>Green-STREAM</i> : Outil d'éco-conception pour les concepteurs de technologies	160
1.1	Méthode utilisée pour le développement	160
1.2	Méthodologie : fonctionnalités, principes intégrés et utilisation	161
1.3	Description détaillée de <i>Green-STREAM</i>	162
1.4	Perspectives pour l'intégration future de <i>Green-STREAM</i>	172
2.	<i>Green-STAMP</i> : un outil d'éco-conception pour les concepteurs de boîtiers	172
2.1	Méthodologie d'éco-conception de boîtier: fonctionnalités et utilisation	172
2.2	Prédiction des impacts environnementaux d'un boîtier en conception	174
2.3	Démonstration de l'utilisation de l'outil sur un cas d'étude	175
2.4	Perspectives pour l'intégration future de l'outil <i>Green-STAMP</i>	178
3.	<i>Green-STEP</i> : un outil d'éco-conception pour les concepteurs de circuit intégré	179
3.1	Fonctionnalités et utilisation	179
3.2	Outil d'évaluation par ACV-simplifiée	180
3.3	Guidelines	186
4.	Retour sur expérience, perspectives et conclusion	188
4.1	Etat des lieux de l'intégration de l'éco-conception et du développement de la plateforme	188
4.2	Perspectives pour l'intégration de démarches d'éco-conception dans l'entreprise ..	190
Conclusion		192
Références bibliographiques		195
Textes réglementaires et normatifs		205
Annexes		206
ANNEXE 1-A. Processus de fabrication d'un transistor		207
Fabrication de la plaquette en silicium – le wafer		207

FEOL: formation des zones actives des transistors.....	207
BEOL : métallisation pour l'interconnexion des transistors.....	209
ANNEXE 1-B. Processus de production d'un boîtier	212
Fabrication du substrat.....	212
Prétraitement de la plaquette	212
Connections électriques	212
Moulage	213
Soudure des billes.....	213
ANNEXE 2. Processus de conception détaillé d'un circuit	214
<i>Spécification comportementale : du cahier des charges à la spécification fonctionnelle</i>	214
<i>Synthèse comportementale : assemblage du circuit électrique</i>	214
<i>Synthèse logique</i>	215
<i>Conception Physique : Génération du Layout</i>	215
<i>Vérification des paramètres électriques</i>	216
ANNEXE 3. Description des outils traditionnels en éco-conception.....	217
Les outils d'évaluation	217
Les outils d'amélioration.....	217
Les outils mixtes d'évaluation et d'amélioration.....	217
ANNEXE 4. Retour d'expérience : suggestions d'amélioration des processus internes pour la réalisation d'ACV par un fabricant de composants microélectroniques	219
ANNEXE 5. Fiche descriptive d'un matériau : exemple de l'hexafluorure de soufre en gravure	221
ANNEXE 6. Checklists	222
Checklist de développement de produit – <i>Green-STEP</i>	222
Checklist de développement de technologies semi-conductrices– <i>Green-STREAM</i>	223
Checklist de développement de boîtier– <i>Green-STAMP</i>	224
ANNEXE 7. Intégration d'un système de gestion de l'environnement orienté-produit par le suivi des performances des produits.....	225

Liste des tableaux

Tableau 1 : Catégories de dommages: exemple de la méthode IMPACT2002+	27
Tableau 2 : Composition moyenne d'une carte mère d'ordinateur [Hagelüken'06-a]	35
Tableau 3 : Masse de métaux récupérés dans 1 tonne de cartes électroniques	36
Tableau 4 : Ratio entre la masse du produit et la masse de matières fossiles utilisées pour la fabrication	41
Tableau 5 : Exemples de législations relatives au Life Cycle Thinking	47
Tableau 6 : Acteurs de la conception	58
Tableau 7 : Freins pour l'analyse environnementale et l'éco-conception d'un produit microélectronique	78
Tableau 8 : Synthèse des problèmes actuels rencontrés en ACV (Adapté de [Reap'08-b])	83
Tableau 9 : Comparaison des deux approches de l'inventaire de cycle de vie	86
Tableau 10 : Comparaison des 2 approches sur les quantités estimées de flux entrants (technologie T1)	86
Tableau 11 : Comparaison des 2 approches sur les quantités estimées de flux entrants (technologie T2)	86
Tableau 12 : Description d'une puce fabriquée avec une technologie NVM à partir de paramètres ..	91
Tableau 13 : Unité fonctionnelle des ateliers – fabrication de la puce et du boîtier	92
Tableau 14 : Liste des groupes de résultats pour la fabrication d'un composant	93
Tableau 15 : Interactions entre l'environnement et les centres de R&D	97
Tableau 16 : Interactions entre l'environnement et les usines de production	98
Tableau 17 : Pressions dans les sites front-end (fabrication de la puce)	100
Tableau 18 : Pressions dans les sites back-end (encapsulation de la puce dans un boîtier)	101
Tableau 19 : Flux significatifs	101
Tableau 20 : Effets des principaux leviers	102
Tableau 21 : Leviers dans la chaîne d'approvisionnement pour les dernières phases du cycle de vie	103
Tableau 22 : Agrégation des impacts générés par une puce sur son cycle de vie	103
Tableau 23 : Indicateurs pour l'amenuisement des ressources énergétiques et minérales	106
Tableau 24 : Indicateurs pour le réchauffement climatique	106
Tableau 25 : Indicateurs mid-points pour l'eutrophisation	107
Tableau 26 : Indicateurs mid-points pour l'écotoxicité aquatique	107
Tableau 27 : Indicateurs mid-points pour oxydation photochimique	108
Tableau 28 : Exemples de l'influence de la localisation d'un site sur la gravité d'un impact	109
Tableau 29 : Indicateur retenus pour caractériser les impacts environnementaux d'un composant ..	110
Tableau 30 : Familles de matériaux	112
Tableau 31 : Catégories d'impacts par famille de matériaux	113
Tableau 32 : Aspects significatifs des procédés	116
Tableau 33 : Statut environnemental en fonction de la déviation	116
Tableau 34 : Indicateurs figurant dans l'EcoFootprint	120
Tableau 35 : KP-Lx liés au KP-LO « matérialisation du produit »	129

Tableau 36 : KP-Lx liés au KP-LO « intégration dans l'application».....	130
Tableau 37 : KP-Lx liés au KP-LO «Stratégie industrielle »	130
Tableau 38 : Niveaux d'abstraction pour les route de fabrication (de la technologie et de l'assemblage)	130
Tableau 39 : Lien entre VOC et EM pour la conception d'un dispositif microélectronique	132
Tableau 40 : Indicateurs suivis pour mesurer l'efficacité de l'intégration de l'outil	140
Tableau 41 : Leviers pour l'intégration d'un outil d'éco-conception.....	151
Tableau 42 : Informations contenues dans la base de données.....	159
Tableau 43 : Modèle de la technologie T1.....	164
Tableau 44 : Description des changements du module FG de T11 par rapport au module T10.....	166
Tableau 45 : Propositions de modification de la recette de gravure STI.....	171
Tableau 46 : Caractéristiques des boîtiers-parent comparées à celles de ϵ	176
Tableau 47 : Description de la chaîne d'assemblage du nouveau boîtier	177
Tableau 48 : Scenarii couverts par <i>Green-STEP</i> et modélisation adéquate.....	181
Tableau 49 : Paramètres-clé de niveau L2 pour le calcul de l'impact en utilisation.....	183
Tableau 50 : Informations récoltées pour l'évaluation environnementale du dispositif	184
Tableau 51 : Description des paramètres-clé pour la construction du modèle du cycle de vie du dispositif.....	185
Tableau 52 : Guidelines de niveau L1	186
Tableau 53 : Paramètres-clé KP-L2 de la responsabilité de l'équipe-projet concevant le circuit.....	187
Tableau 54 : Résultats des interviews des utilisateurs de <i>Green-STREAM</i>	190
Tableau 55 : Niveaux principaux de DfX	218
Tableau 56 : Niveaux secondaires de DfX.....	218
Tableau 57 : Suggestions pour l'amélioration de l'inventaire du cycle de vie sur le site de production	219
Tableau 58 : <i>Green-X</i> pour éco-concevoir un produit microélectronique.....	225

Liste des figures

Figure 1 : Piliers du développement durable.....	19
Figure 2 : Optimisation et compromis dans la recherche des solutions.....	20
Figure 3 : Cycle de vie d'un produit	21
Figure 4 : Illustration du phénomène de transfert de pollution.....	22
Figure 5 : Cycle de vie d'un composant microélectronique.....	29
Figure 6 : Fonction du boîtier.....	31
Figure 7 : Différents cycles d'utilisation pour un même produit	32
Figure 8 : Processus schématisé du recyclage des cartes électroniques.....	34
Figure 9 : Evolution des législations environnementales dans le monde de 2000 à 2009	47
Figure 10 : Modélisation simplifiée du processus de conception [Pahl'96]	53
Figure 11 : Relations entre les technologies et les objets [Mazukawa'00].....	55
Figure 12 : Niveaux d'abstraction [Rabaey'03]	55
Figure 13 : Modèle simplifié de conception d'un produit microélectronique.....	57
Figure 14 : Acteurs de la phase de clarification	59
Figure 15 : Processus simplifié de la conception VLSI.....	61
Figure 16 : Possibilité de réduction des impacts en fonction du cycle de vie d'un produit	64
Figure 17 : Niveaux d'intégrations antagoniques de l'environnement dans le développement de produit	65
Figure 18 : Classification des outils [Janin'00]	66
Figure 19 : Niveaux d'intégration de l'éco-conception en fonction du degré d'innovation [Brezet'97-a]	68
Figure 20 : Schéma de la méthodologie de recherche	80
Figure 21 : Méthodologie d'ACV en quatre étapes.....	82
Figure 22 : Segmentation de l'ICV et méthode préconisée	88
Figure 23 : Segmentation de la route de fabrication d'une puce en modules	90
Figure 24 : Emissions carbonees (IPPC) pour 4 composants (2009).....	99
Figure 25 : Segmentation du produit microélectronique sur son cycle et jeux d'indicateurs.....	111
Figure 26 : Méthode de caractérisation des technologies de fabrication	117
Figure 27 : Présentation de l'EcoFootprint d'un site	121
Figure 28 : Comparaison des scores normalisés par différentes méthodes pour la puce (seuil à 5%)	123
Figure 29 : Normalisation de plusieurs technologies de puces – Résultats par unité de surface et par masque.....	123
Figure 30 : Système de classification pyramidal	124
Figure 31 : Flux d'informations pour la modélisation environnementale d'un produit	127
Figure 32 : Structure du mécanisme du Cheval de Troie Méthodologique [Reyes 07]	136
Figure 33 : Processus d'acquisition de la connaissance selon différentes phases du co-développement.....	138
Figure 34 : Checklists validant le passage entre les phases de conception	147
Figure 35 : Objectifs de la méthodologie d'éco-conception.....	149

Figure 36 : Modélisation du cycle de vie d'un objet en conception par analogie	153
Figure 37 : Utilisation de l'ACV-simplifiée pour prédire les impacts d'un nouvel objet	153
Figure 38 : Processus de conception et utilisation de la plateforme d'éco-conception.....	155
Figure 39 : Utilisation de la plateforme d'éco-conception sur un produit industrialisé.....	156
Figure 40 : Cadre et limites de la méthodologie	157
Figure 41 : Articulation des outils de la plateforme autour d'une base de données	158
Figure 42 : Fonctionnalités de <i>Green-STREAM</i>	161
Figure 43 : Fonctionnement de <i>Green-STREAM</i>	162
Figure 44 : Description d'une nouvelle technologie en fonction des modules des technologies-mère	163
Figure 45 : Impacts environnementaux de la technologie T11 et de ses technologies-mère	165
Figure 46 : Bénéfice environnemental entre les modules FG de T10 et T11.....	167
Figure 47 : Représentation schématique du dépôt de résine sur une plaquette.....	167
Figure 48 : Comparaison des performances environnementales des étapes de gravure poly de T11	169
Figure 49 : Impact des étapes de la gravure STI sur les trois indicateurs	170
Figure 50 : Contributions des flux au réchauffement climatique pour l'étape HMNIT	170
Figure 51 : Vue générale du bloc (à gauche) / zoom sur le Top Corner Rounding (à droite)	171
Figure 52 : Fonctionnalités de <i>Green-STAMP</i>	173
Figure 53 : Fonctionnement de <i>Green-STAMP</i>	174
Figure 54 : ACV-simplifiée de niveau 4 d'une recette-fille avec possibilité de déduire les KP-L4 à partir d'une recette-mère	175
Figure 55 : Performances environnementale du boîtier ϵ et de ses boîtiers-parent	178
Figure 56 : Evaluation environnementale au niveau 3 pour le boîtier ζ	178
Figure 57 : Fonctionnalités de <i>Green-STEP</i>	179
Figure 58 : Fonctionnement de <i>Green-STEP</i>	180
Figure 59 : Répartition des impacts du dispositif sur les phases du cycle de vie (réchauffement climatique)	185
Figure 60 : Eléments méthodologiques testés par des équipes-pilote.....	189
Figure 61 : Principe de la photolithographie	208
Figure 62 : Formation de motifs dans une couche par photolithographie/gravure.....	208
Figure 63 : Implantation ionique pour formation des zones source et drain.....	209
Figure 64 : Bornes du transistor.....	209
Figure 65 : Principe du PVD.....	209
Figure 66 : Principe de la diffusion / réaction en surface, diffusion puis réaction	210
Figure 67 : Structure du transistor à la fin du FEOL	210
Figure 68 : Dépôt de couche d'une couche de métal, formation de vias et dépôt d'une couche oxyde diélectrique	211
Figure 69 : Planarisation par CMP.....	211
Figure 70 : Structure final d'un transistor CMOS.....	211
Figure 71 : Deux techniques de connexion d'une puce au boîtier	212
Figure 72 : Photographie d'une puce après ouverture du boîtier	213
Figure 73 : Lien entre temps de développement et surface du circuit selon les méthodes de conception	215

Acronymes

ACV	Analyse de cycle de vie
BGA	Ball Grid Array. <i>Famille de boîtier composé d'une matrice de billes de soudures</i>
CFC	Chlorofluorocarbures
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COV	Composés Organiques Volatils
DfE	Design for Environment
DfX	Design for X
EDI	Eau Déionisée
EMR	Environmental Minimum Requirement
EMS	Environmental Management System ; <i>correspond à l'abréviation française « SME »</i>
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EuP	Energy Using Product
HFC	Hydrofluorocarbures
ICV	Inventaire du Cycle de vie
ISO	International Standardization Organization
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors
KEPI	Key Environmental Priority Indicators
KPI	Key Priority Indicators
LCA	Life Cycle Assessment ; <i>correspond à l'abréviation française « ACV »</i>
LCI	Life Cycle Inventory ; <i>correspond à l'abréviation française « ICV »</i>
LCM	Life Cycle Modeling
LCPD	Life Cycle Process Design
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
NVM	Non Volatile Memory
PFC	Perfluorocarbures
PIP	Politique Intégrée de Produits
POEMS	Product-Oriented Environmental Management System
R&D	Recherche et Développement
REACH	Registration Evaluation Authorization of Chemicals
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises
SME	Système de management environnemental
STI	Shallow Trench Isolation
TIC	Technologies de l'Information et des Communications
UPW	Ultra Pure Water; <i>correspond à l'abréviation française « EDI »</i>
VHDL	VHSIC Hardware Description Language ; <i>langage de description de matériel destiné à représenter le comportement et l'architecture d'un système électronique numérique.</i>

Introduction

Toute activité industrielle ou commerciale laisse une empreinte sur l'environnement du fait de l'utilisation d'énergie ou de matières premières, de la production de déchets ou de l'émission d'effluents dans le milieu naturel. De tels impacts surviennent au niveau local, transfrontalier ou mondial et ont des implications sur la santé. Ils varient selon le bien ou le service considéré en fonction des matières premières, des processus de transformation et de fabrication mis en jeu, de la conception, des technologies et techniques employées lors de la fabrication, du type de bien créé, de l'emballage, du mode de distribution et du mode d'élimination.

Avant 1980, la plupart des entreprises adoptaient une approche non coordonnée face à la protection de l'environnement. On projetait des installations et des processus en accordant qu'une attention limitée à leurs impacts, privilégiant une technologie curative en « bout de chaîne » qui se contentait de répondre aux prescriptions des réglementations. Par la suite, les entreprises ont évolué vers une approche plus globale, fondée sur la prévention, où les facteurs environnementaux sont intégrés dès les premières phases de mise en projet : on parle de gestion de l'environnement préventive. Depuis la fin des années 90, les entreprises industrielles mettent l'accent sur des projets où les impacts environnementaux sont diminués directement depuis la source, c'est-à-dire avant même que le produit soit fabriqué. L'éco-conception est alors une approche systématique pour concevoir les produits en prenant en considération les impacts environnementaux du cycle de vie des produits. Les contraintes liées aux impacts environnementaux doivent être intégrées dans les stades avancés de la conception et considérées comme un facteur important dans la prise de décision en conception. La mise en place d'un système de gestion de l'éco-conception dans une entreprise est étroitement liée aux produits qu'elle fabrique, conçoit, distribue et vend ainsi qu'à l'organisation du travail dans cette entreprise. L'éco-conception représente un processus naturel pour les entreprises qui souhaitent assumer leur rôle dans la protection de l'environnement, de la santé et des ressources.

Cette évolution de la prise en compte de l'environnement dans les milieux industriels répond à des pressions internes et externes : une législation de plus en plus stricte et mieux appliquée, une sensibilisation accrue de la population et des groupes de pression, un consumérisme vert et le comportement du personnel de l'entreprise. Les pionniers sont des sociétés opérant dans des secteurs industriels considérés « polluants », notamment les industries chimiques, pétrolières et gazières.

La microélectronique est une industrie-clé dans l'économie globale, possédant une capacité de développement bien plus rapide que dans n'importe quel autre secteur. Cependant, du fait de la taille microscopique de ses produits, cette industrie s'est trouvée longtemps à l'abri de considérations environnementales liées directement aux produits mis sur le marché. La pression, issue d'organisations non gouvernementales de protection de l'environnement, a plutôt épargné ce secteur d'activité peu connu du grand public.

Toutefois, avec le durcissement du contexte réglementaire et l'introduction des principes de responsabilité étendue du producteur, l'intégration de critères environnementaux en conception est

une préoccupation émergente aussi pour les fabricants de composants microélectroniques. Cette industrie prend conscience de ses responsabilités environnementales et développe ses propres réponses et mécanismes industriels pour prendre davantage en compte cet aspect. L'application des réglementations a ainsi poussé les fabricants à retirer des substances dangereuses et toxiques de la composition des produits ainsi qu'à en réduire drastiquement la consommation d'électricité pendant l'utilisation en développant des circuits plus efficaces énergétiquement. Ainsi, jusqu'à aujourd'hui, l'effort de conception a été en priorité centré sur ces deux aspects, tout en continuant à miniaturiser les produits. La miniaturisation, régie par la loi de Moore, est le principe de base qui assure la compétitivité internationale des entreprises du secteur.

Depuis quelques années, ces entreprises ont choisi de s'impliquer dans des pratiques d'éco-conception car elles se doivent d'une part de connaître précisément les impacts environnementaux de chacun des produits afin d'en améliorer les performances, et d'autre part, de renseigner les clients qui mettent sur le marché les produits finis en certifiant les produits intermédiaires.

Dans ce contexte, la thèse a été financée par une bourse CIFRE et réalisée à temps plein dans l'entreprise STMicroelectronics, 7^{ème} fabricant mondial de semi-conducteurs en 2011 et 1^{er} européen, sur le site de Rousset (13). Deux équipes de l'entreprise ont soutenu le projet : *Technology R&D* du *Technology Rousset Center*, en charge du développement des nouvelles technologies de fabrication pour le site de Rousset et l'équipe *Corporate Sustainable Development*, en charge du déploiement du programme d'éco-conception pour la société. La mission industrielle portait sur l'intégration de l'environnement au sein des activités de conception.

L'objectif général de ce travail de recherche est d'investiguer les politiques de produits éco-conçus afin de définir une stratégie d'éco-conception pour le secteur de la microélectronique s'appuyant sur une méthodologie et ses outils associés permettant son implémentation réelle. La conception est à prendre au sens très large de tout ce qui contribue à définir les structures et les propriétés d'un produit sur son cycle de vie. Une méthodologie d'éco-conception vise à accroître la sensibilité des concepteurs au sujet de l'environnement et les conduire à explorer de façon systématique des possibilités novatrices, qui peuvent influencer positivement sur l'environnement, durant les premiers stades de la conception.

La partie I porte sur une étude générale du contexte environnemental et industriel et sur la logique de l'intégration de l'éco-conception en industrie, rapidement recentrée sur les problématiques propres à l'environnement industriel de la microélectronique. De la connaissance précise du produit sur son cycle de vie, des spécificités de la conception et des interactions avec l'environnement, les stimuli et freins à l'intégration de l'éco-conception dans les systèmes de management environnementaux existants sont identifiés. Le secteur microélectronique, jusque-là centré sur des problématiques de mise en conformité avec les réglementations en vigueur, se structure progressivement pour répondre à des exigences environnementales liées directement aux produits mis sur le marché. Toutefois, les réponses apportées jusqu'alors ne permettent pas d'affirmer l'existence de systèmes robustes d'intégration de l'environnement en conception. Cette première partie nous amènera à la question de recherche suivante : « la prise en compte de la dimension environnementale peut-elle être mise en œuvre dès les stades préliminaire de la conception d'un produit microélectronique ? ».

La partie II a attrait à la caractérisation environnementale du produit microélectronique sur son cycle de vie, le but étant de dresser le profil environnemental de n'importe quel composant. La connaissance des impacts environnementaux réellement générés par un composant présente des lacunes, à la fois du fait de la complexité technologique et de la maturité des systèmes d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit en conception, qu'il soit au stade de concept ou de prototype. Nous envisagerons ainsi des méthodes de calcul des impacts environnementaux susceptibles d'être utilisées pour la caractérisation d'un produit, y compris lors de sa conception. Finalement, les grandeurs et paramètres de conception utiles pour calculer les impacts environnementaux d'un produit microélectronique sont identifiés ainsi que les responsabilités environnementales des différents acteurs sur le cycle de vie du produit.

La partie III décrit les éléments méthodologiques créés pour répondre à la problématique d'intégration de l'environnement en conception pour tous les aspects de la conception du produit microélectronique. Depuis l'identification de la complexité des processus mis en œuvre en conception, une stratégie d'intégration de l'éco-conception est suivie afin d'assurer l'assimilation des méthodes et outils imaginés dans le quotidien des concepteurs. La méthodologie ainsi développée permettra d'éco-concevoir le produit aux différents stades de la conception et donc en fonction du niveau de connaissance sur le produit. Les aspects méthodologiques sont illustrés par des études de cas.

Partie I

Problématique de l'éco-conception dans l'industrie microélectronique

Chapitre 1 : Environnement, nouvelle dimension en conception

1 Produits industriels et environnement

1.1 Définitions et principes en éco-conception

L'éco-conception, appelée aussi « design for environment », est une activité visant à intégrer des aspects environnementaux pendant la conception et le développement d'un produit (ou d'un service)¹. [Fiksel'96] définit l'éco-conception comme la considération systématique des performances en conception « with respect to environmental, health and safety objectives over the full product and process life cycle ».

Selon la Directive Européenne 2009/125, l'éco-conception est « l'intégration des caractéristiques environnementales dans la conception du produit en vue d'en améliorer la performance environnementale tout au long de son cycle de vie ».

Son objectif peut être compris comme la volonté d'améliorer la conception par le développement de techniques pour la prise en compte des performances environnementales du produit considérant les différentes phases de son cycle de vie. Le cycle de vie d'un produit se divise en plusieurs phases distinctes : l'extraction des matières premières, la fabrication, la distribution, l'utilisation et la fin de vie.

Selon le rapport Brundtland [WCED'87], le développement durable se donne comme objectif de « répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leurs propres besoins ». Selon cette définition, l'éco-conception correspond à la partie « viable » du développement durable : elle se situe à l'intersection de l'écologie et de l'économie (Figure 1).

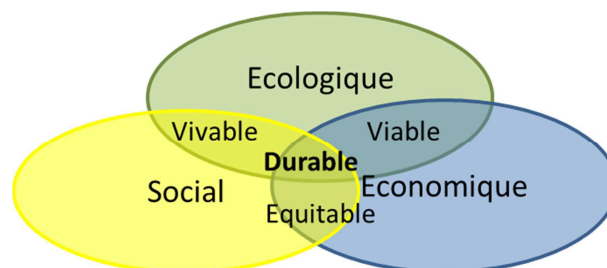


Figure 1 : Piliers du développement durable

Dans un contexte industriel, les concepteurs cherchent un compromis entre l'environnement et des valeurs industrielles traditionnelles telles que la faisabilité, la fonctionnalité, le coût, la marge, l'esthétique, la durabilité, l'ergonomie, l'image ou la qualité générale [Janin'00]. Un produit éco-conçu est une version d'un produit avec moins d'impacts sur l'environnement et qui respecte les objectifs du cahier des charges en termes de coût, performance et qualité. L'éco-conception tend à

¹ Par la suite, nous parlerons uniquement d'éco-conception de produits

développer des solutions innovantes qui répondent à la fois à ces valeurs traditionnelles et à des exigences environnementales.

1.2 Améliorer l'éco-efficacité

Le World Business Council for Sustainable Development donne à l'éco-efficacité, la définition suivante : «Eco-efficiency is reached by the delivery of competitively priced goods and services that satisfy human needs and bring quality of life while progressively reducing ecological impacts and resources intensity, throughout the life cycle, to a level at least in line with the earth's (estimated) carrying capacity ». Les objectifs d'une stratégie environnementale intégrant l'éco-conception sont mixtes : améliorer la situation économique, diminuer les temps de développement et réduire l'impact environnemental des produits² tout en augmentant leur qualité. Dans ce contexte, l'éco-efficacité est défini comme suit :

$$\text{Eco-efficacité (Produit)} = U (\text{Produit}) / IE (\text{Produit})$$

avec

$U (\text{Produit})$ est la valeur d'usage ou la performance du produit, en termes de fonctionnalités ;

$IE (\text{Produit})$ est l'impact environnemental ou la performance environnementale du produit.

Selon cette définition, on stipule que l'impact sur l'environnement d'un produit doit être considéré relativement au service rendu par ce produit. L'éco-efficacité est utilisée pour mesurer les progrès d'un produit éco-conçu : un coefficient élevé est attribué à un produit qui contribue à la prospérité environnementale. La manière d'améliorer l'éco-efficacité d'un produit est à la fois d'augmenter sa valeur d'usage et de diminuer son impact environnemental (Figure 2). Une conception alternative plus écologique devra être élaborée sans compromettre les niveaux de qualité et fiabilité.

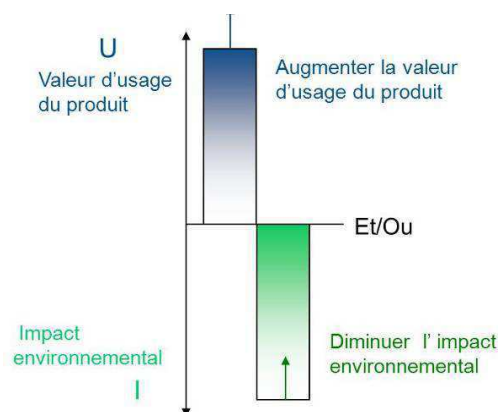


Figure 2 : Optimisation et compromis dans la recherche des solutions

Toutefois, cette notion de l'augmentation constante de la valeur d'usage est soumise à réflexion : si diminuer l'impact environnemental de nos activités est une vraie préoccupation dont l'urgence n'est toujours que croissante, qu'en est-il du besoin de la société de posséder des produits dont la valeur d'usage est sans cesse augmentée ? Certes aujourd'hui, le progrès est lié aux performances et se fait souvent au détriment de la qualité environnementale, mais si demain le

² Le terme « impact environnemental » au singulier est un équivalent d'empreinte environnementale. Il s'agit d'un concept lié à la modification de l'environnement par un produit sans jugement de valeur.

modèle sociétal recherche des solutions plus respectueuses de l'environnement, cette valeur d'usage peut tendre naturellement à diminuer, en ramenant la fonctionnalité d'un produit aux besoins réels de ses utilisateurs. Ainsi, le principe de l'éco-efficacité nous rappellera que ces deux paramètres sont dépendants.

On retrouve le principe d'éco-efficacité intégré dans d'autres concepts d'écologie industrielle. Par exemple, le Factor X est un concept développé pour mesurer à la fois l'amélioration de la qualité du produit et la réduction de consommation de matières premières et d'énergie. [Reijnders'98] définit le facteur X comme suit : « le facteur X est qualitativement similaire aux concepts de dématérialisation, d'éco-efficacité et d'accroissement de la productivité des ressources naturelles ». Pour Reinjders, ce facteur donne une quantification de l'éco-efficacité et de la dématérialisation. Ce concept peut s'appliquer aussi bien à un produit qu'à une économie dans son ensemble. Il s'agit en fait de définir le facteur «durable» de consommation des ressources. Un « Facteur 10 » suggère qu'un développement sur le long terme requiert de se concentrer sur la diminution par 10 des flux de matières. Ces idées ont pris racine des concepts d'écologie industrielle et de l'analyse des flux de matières et s'intègrent donc naturellement dans les métabolismes industriels. Ce concept peut être repris et généralisé à l'impact environnemental au lieu de la consommation de matière.

1.3 Notion de cycle de vie d'un produit

Le cycle de vie d'un produit, représenté schématiquement sur la Figure 3, commence lors de l'extraction des matières premières qui composent le produit ou qui sont utilisées lors des différentes phases du cycle de vie, et finit lors de l'élimination en déchet du produit, en passant par les étapes intermédiaires de fabrication, distribution et d'utilisation.

Aujourd'hui une meilleure prise en compte des problématiques environnementales passe par une connaissance accrue des impacts sur l'environnement, la santé et l'utilisation de ressources liés au cycle de vie du produit, et non plus seulement du site de production ou du produit une fois entre les mains de l'utilisateur. On appelle ce mode de réflexion industrielle, le « Life Cycle Thinking ».

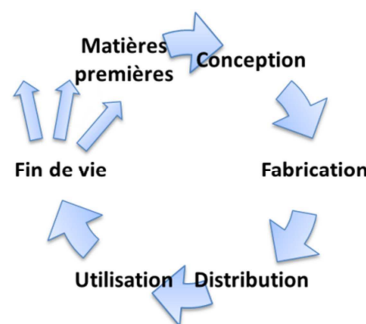


Figure 3 : Cycle de vie d'un produit

Les mécanismes d'éco-conception considèrent les phénomènes de relocation ou de transfert de pollutions. Quand un concepteur veut agir pour diminuer un impact environnemental, il doit s'assurer que ses mesures n'amplifient pas l'empreinte environnementale ailleurs dans le cycle de vie ou ne génèrent pas une pollution sur un autre aspect environnemental (Figure 4). Les indicateurs utilisés à des fins d'éco-conception doivent mesurer simultanément tous les impacts

environnementaux potentiels, de façon à pouvoir évaluer les transferts de pollution entre aspects environnementaux et entre les phases du cycle de vie du produit.

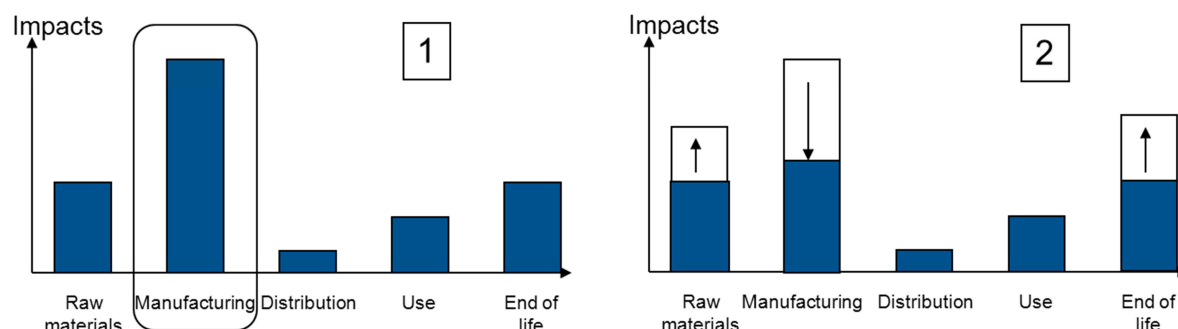


Figure 4 : Illustration du phénomène de transfert de pollution

La stratégie environnementale des entreprises est traditionnellement conduite par la volonté de réduire les impacts environnementaux des sites. Dans les décennies précédentes, les efforts étaient centralisés sur des solutions dites « bout de chaîne ». Il s'agissait de réduire les impacts environnementaux locaux en traitant, nettoyant, abattant et filtrant les émissions et substances rejetées hors des sites. Aujourd'hui, la responsabilité environnementale d'une entreprise n'est plus seulement limitée au cadre du site de production comme le prévoient les systèmes de management environnemental classiques. Désormais, on parle de « Système de Management Environnemental Orienté Produit » (en anglais POEMS). L'approche « produit » doit alors être complémentaire et cohérente de l'approche « site », la plupart du temps déjà existante et qui peut être validée par la certification ISO14001.

L'éco-conception ne peut être intégrée dans une entreprise sans un solide socle de gestion environnementale sur ses sites. Toutefois, cette gestion n'est plus suffisante aujourd'hui pour affirmer qu'une entreprise est réellement engagée dans une démarche de responsabilité sociétale (RSE)³. La gestion de l'environnement doit être intégrée : cela réaffirme la nécessité d'une approche globale visant à considérer les impacts environnementaux du produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Les principes de cette gestion intégrée sont institutionnalisés par la Commission Européenne et portés par la « Politique Intégrée des Produits » (PIP). Le livre vert de la PIP pose les principes de base définis selon sept axes stratégiques :

- gestion des déchets (reprise obligatoire par le producteur) ;
- innovation de produits verts⁴ (éco-conception, stimulation de la R&D) ;
- création de nouveaux marchés ;
- transmission de l'information (écolabels, déclarations de produits) ;
- responsabilité environnementale ;
- consommation durable ;
- gestion des agents chimiques.

Le livre vert propose une stratégie de promotion d'un marché propice à la commercialisation de produits verts. La PIP a pour ambition d'agir simultanément sur l'offre en produits verts proposée

³ La RSE est la déclinaison des principes du développement durable à l'échelle de l'entreprise

⁴ Le terme « vert » désigne des produits jugés respectueux de l'environnement.

par l'industriel et sur la demande de ces produits émanant du consommateur. S'inscrivant dans le cadre d'une économie libéralisée, une PIP n'a pas vocation à être légiférée : l'orientation donnée par la Communauté européenne est incitative plutôt que contraignante.

Les instruments proposés sont la fiscalité par l'internalisation des coûts environnementaux externes, l'application du principe pollueur-payeur et la responsabilité environnementale du producteur concernant le produit fabriqué. Par ailleurs, le livre vert centre son action sur les mécanismes de convergence entre l'offre et la demande de produits verts : cela met en exergue le rôle crucial du consommateur dans la problématique d'éco-conception, et sur l'importance de la sensibilisation et de l'information quant à l'importance environnementale de l'acte d'achat.

En résumé, les principes de politique intégrée de produits tendent à ce que l'environnement soit perçu par les parties prenantes, internes et externes à l'entreprise, comme une partie exclusive de l'entreprise au même titre que d'autres valeurs et qu'il peut être un nouveau vecteur d'innovation dans l'actuelle organisation du travail. La réponse aux principes de la PIP par l'entreprise doit venir compléter la politique environnementale existante en proposant une approche originale centrée sur le produit. Cette réponse réside dans une approche globale et multicritère, principe de base de l'éco-conception.

2 Analyse environnementale

Avant d'envisager des améliorations sur les performances du produit comme le prévoit l'éco-conception, l'étape préliminaire est de dresser un profil, une photographie, des impacts générés par un produit. La section suivante décrit le principe et la méthodologie d'analyse de cycle de vie.

2.1 Principe de l'Analyse de cycle de vie

La méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est reconnue internationalement et par la plupart des communautés scientifiques comme un outil puissant capable de calculer les impacts générés par des produits sur leur cycle de vie⁵. L'ACV est définie par l'ISO14040 comme « la compilation et l'évaluation des entrants et sortants, ainsi que des impacts potentiels environnementaux d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». L'ACV donne lieu à de nombreuses recherches académiques et au développement de plusieurs méthodes. Il existe une revue entièrement dédiée à cette analyse environnementale, « International Journal of Life Cycle Assessment ». Pour son éditeur, Walter Klöpffer, l'ACV est « a recognized instrument to assess the ecological burdens and impacts connected with products and systems, or, more generally, with human activities ».

L'ACV est une méthode quantitative d'analyse et de calcul des impacts générés par un produit ou un système au cours de son cycle de vie, reposant sur le bilan quantifié des flux de matières et d'énergie entrants et sortants de chacun des procédés élémentaires d'un système. L'ACV permet de définir un profil environnemental et de quantifier les impacts d'un produit (respectivement service, bien, matériau ou même procédé de fabrication) en considérant toutes les phases du cycle de vie.

En fonction de l'objet de l'étude, les impacts couramment retenus sont l'effet de serre, l'acidification, l'épuisement des ressources naturelles, l'eutrophisation... On appelle ces différents aspects environnementaux des catégories d'impact. La complexité des phénomènes en jeu et de

⁵ SETAC, Guidelines for Life Cycle Assessment, Brussels, 1993. <http://www.setac.org>

leurs interactions est source d'incertitude sur la valeur réelle des impacts sur l'environnement (ex : non prise en compte des effets de synergie ou d'antagonisme entre polluants, des caractéristiques particulières du milieu local, des effets de cinétique, etc.) : c'est à ce titre que le qualificatif « potentiel » est utilisé et on parle alors d'impacts potentiels.

Pour exprimer les résultats de l'analyse et comparer le comparable (c'est-à-dire raisonner à service rendu identique), on définit l'unité fonctionnelle. C'est un élément de mesure qui permet de quantifier la fonction remplie par le produit étudié. Par exemple, l'unité fonctionnelle d'une peinture pourra être « recouvrir 100 mètres carrés de surface avec une opacité de 0.98 (mesurée avec un opacimètre) pour une durée de 20 ans ».

L'ACV est la méthodologie la plus largement utilisée pour réaliser un bilan environnemental complet d'un produit. Il est important de savoir que cette méthodologie est mondialement reconnue et que sa pratique dans les entreprises s'est généralisée, en même temps que l'émergence des concepts de « life cycle thinking » dans les milieux industriels.

C'est une aide à la conception dans le sens où elle permet d'évaluer les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie d'un processus ou d'un produit. Le fait d'identifier les points faibles d'un système (procédé, produit, élément du produit) fournit un certain nombre d'options pour améliorer la conception. L'ACV devient alors un outil puissant qui aide à identifier des solutions plus durables [Azapagic'99]. Pour [Grisel'04], l'ACV apporte de la fiabilité dans les démarches d'amélioration des produits. Par la suite, nous appellerons « profil environnemental », les résultats de l'ACV mis en forme : l'ACV est utilisée pour donner une caractérisation d'un produit en termes environnementaux. Cette description, c'est-à-dire ce profil, donne la connaissance nécessaire au concepteur et aux autres parties prenantes des sources d'impacts, des impacts et donne la fonction de transfert entre les paramètres de conception et les impacts associés.

Traditionnellement, l'ACV est appliquée à des produits : des études suggèrent également qu'elle peut être utilisée pour trier des options dans des processus de sélection, de conception et d'optimisation [Blowers'04] [Ribeiro'08]. On considérera alors des aspects jusqu'alors rarement intégrés : la chaîne d'approvisionnement et ses impacts spécifiques, la consommation de matières premières ou l'élimination des déchets. Ces méthodes, dites de Life Cycle Process Design (LCPD), offrent une perspective d'innovation pendant la définition de concept de procédé, grâce à la sélection de matériaux meilleurs et de solutions alternatives. Quelques études dans la littérature, comme celle de [Szendiuch'07], suggèrent également que l'ACV couplée à de l'optimisation multi-objectifs fournit un support solide pour la conception de procédés en les optimisant simultanément sur des critères environnementaux, techniques et économiques.

2.2 Méthodologie pour la réalisation d'une ACV

En pratique, les flux énergétiques et de matières, entrants ou sortants, sont inventoriés. Cette étape est l'ICV (Inventaire de Cycle de Vie). Après la compilation et l'analyse préliminaire de l'inventaire du cycle de vie, il est nécessaire de déterminer les pressions et impacts qui sont associés à des émissions dans l'environnement naturel et la consommation des ressources. Pour ce faire, l'ACV fournit des indicateurs pour l'interprétation des données d'inventaire en fonction de leurs contributions aux différentes catégories d'impact. La portée de l'évaluation est limitée à l'examen des contributions aux impacts à des échelles régionale et mondiale. Les indicateurs reflètent alors la somme des contributions des flux à chaque catégorie d'impact.

Les outils d'ACV fournissent des indicateurs et des méthodes pour analyser les potentiels contributeurs des données d'inventaire aux différentes catégories d'impact : les outils procèdent une évaluation numérique des impacts à partir de ces données grâce à des coefficients préétablis permettant de calculer la contribution de chaque flux à divers impacts environnementaux.

Les méthodes d'ACV relient, autant que possible, les résultats de l'ICV aux impacts environnementaux correspondants. Selon la norme ISO14044, les résultats d'ICV sont classés dans des catégories d'impact, chacun avec un indicateur de catégorie. Les résultats d'ICV avec des impacts similaires (par exemple tous les flux élémentaires qui influent sur les concentrations de gaz à effet de serre) sont regroupés en catégories d'impact à un niveau « midpoint ».

Le terme « midpoint » [Humbert'05] exprime le fait que ce point est situé à une position intermédiaire de la chaîne de causes à effets, quelque part entre les résultats d'ICV et le dommage « endpoint » autrement dit le point où l'effet sur l'environnement se produit. Les catégories « midpoint » sont liées à des mécanismes communs (comme ceux du changement climatique) ou à des regroupements communément acceptés (comme l'écotoxicité), exprimées par un indicateur midpoint. Un tel indicateur caractérise les flux élémentaires qui contribuent au même impact. En conséquence, une nouvelle étape peut attribuer ces catégories midpoint à une ou plusieurs catégories de dommages, la dernière représentant les variations de qualité de l'environnement.

La classification précédente permet de comparer les effets environnementaux de deux produits. Un résultat sur un indicateur d'impact est la représentation quantifiée d'un changement de qualité de l'environnement. Dans la pratique, un indicateur d'impact est le modèle simplifié d'une réalité complexe, donnant seulement une approximation grossière des effets d'un produit sur l'environnement. Il existe deux méthodes de caractérisation des impacts à partir des flux d'ICV.

- Une méthode orientée-impact restreint la modélisation quantitative à un stade relativement précoce de la chaîne de causes à effets, ce qui permet de limiter les incertitudes et grouper les résultats de l'ICV dans les catégories d'impact intermédiaires.
- Une méthode orientée-dommage modélise la chaîne de causes à effets jusqu'à la dernière extrémité et prend en compte les interactions entre les résultats de l'ICV, parfois avec de grandes incertitudes. Ainsi, chaque catégorie midpoint peut être liée à une ou plusieurs catégories d'impact.

La plupart des méthodes (EDIP, CML et IMPACT 2002 +) combinent ces deux approches. Les deux principaux critères pour choisir une méthode sont l'exhaustivité (longueur de chaîne de causes à effets, nombre de substances incluses) et la qualité de l'éventail de ses catégories d'impacts.

2.3 Description des étapes facultatives en ACV

Une fois les impacts environnementaux d'un produit qualifiés et quantifiés, il existe dans les techniques permettant de traiter les résultats pour en faciliter l'interprétation.

2.3.1 Normalisation : définition d'une référence pour souligner les effets les plus critiques

Après la caractérisation des impacts, les catégories d'impact sont quantifiées sur des indicateurs dont les unités sont différentes et donc l'intensité et la gravité sur un effet environnemental ne sont pas comparables d'une catégorie d'impact à une autre. L'étape de normalisation consiste à

comparer pour chaque effet les scores à un autre score, le facteur de normalisation. Il est communément admis que la normalisation possède trois intérêts principaux :

- disposer d'informations plus propres à la communication que des résultats bruts issus de la caractérisation. A ce propos, [Guinée'93] écrit la phrase suivante : « The effect scores become more meaningful by converting them to a relative contribution to the different problem types by means of normalization ».
- traduire l'importance relative de l'impact du cycle de vie par rapport à une référence. En fonction de l'objectif atteint, notamment en éco-conception lorsque l'ACV est une aide à la décision, la normalisation s'avère intéressante. Elle permet de simplifier le problème pour des ingénieurs non-experts en analyse environnementale.
- permettre une vérification des incohérences, dans le cas de l'obtention d'un ou plusieurs résultats normalisés anormalement hauts ou bas.

Si son intérêt est facilement intelligible, la normalisation est souvent critiquée par la communauté scientifique car cette étape contribue à augmenter les incertitudes sur les résultats de l'évaluation des impacts. La cause est l'obtention des valeurs de référence. Il existe trois modes principaux de définition de facteurs de normalisation pour un système.

- L'impact du cycle de vie du système dans un scénario donné.

On l'utilise pour comparer différents scénarii. La référence est l'un des scénarii, généralement celui correspondant à la situation actuelle. Si les différentes possibilités ont été évaluées de façon cohérente, il n'y a pas d'incertitude supplémentaire. Toutefois, les résultats normalisés devront impérativement être mis en regard avec les résultats bruts du scénario de référence afin de ne pas accorder trop de crédit à une variation relative importante due à un impact du scénario de référence excessivement faible.

- L'impact total dû aux activités humaines sur une zone géographique donnée.

L'impact est ramené au nombre d'habitants. La normalisation permet de voir la contribution d'un produit sur l'effet déjà existant. Chaque effet est comparé à l'effet total connu de cet impact. La signification du résultat normalisé est la contribution du cycle de vie étudié à la charge environnementale totale mesurée pour la zone. Ce type de normalisation a l'avantage de voir la contribution relative de la fabrication d'un produit à un effet déjà existant.

Le choix de la zone, s'il est immédiat car correspond à la portée géographique d'intérêt, définie lors de la première phase de l'ACV, introduit des distorsions dans la signification des résultats normalisés et donc dans leur interprétation car l'ensemble des impacts mesurés lors de l'évaluation de l'impact du cycle de vie ne relève pas de cette zone. Si une de ces zones est sensible (ou inversement peu sensible) à un impact donné par comparaison aux autres, alors les valeurs normalisées seront sous-estimées sur cette zone (ou inversement surestimées).

- La donnée d'objectifs environnementaux

La valeur de référence représente un objectif quantifié d'impact. Un EMR, pour « environmental minimum requirement », est une valeur unique (un seuil) ou un ensemble de valeurs (une plage) pour un indicateur qui fournit une base de référence permettant de mesurer si un système contribue positivement ou négativement à la préservation de l'environnement. Si la valeur d'un

indicateur est la même que l'EMR, alors aucun impact (positif ou négatif) sur la performance de la fonction de l'environnement relatif à l'indicateur d'état est détecté. Si les valeurs des indicateurs d'état n'atteignent pas le EMR ou le dépasse, une analyse des écarts est effectuée. L'écart entre la valeur d'un indicateur environnemental et l'EMR identifie l'impact positif ou négatif d'un système [Bastian'06]. Cette méthode souffre du défaut d'être spécifique à une situation et des objectifs donnés, mais ne présente pas de distorsion majeure.

2.3.2 Agrégation : regroupement des catégories d'impact

Le regroupement est une étape qualitative consistant en un tri des catégories d'impact considérées lors de l'analyse. Son effet relève essentiellement de la présentation des résultats, mais elle est utilisée également pour faciliter la mise en œuvre de la pondération. Deux modes opératoires sont envisageables : le tri et le classement. Le tri des catégories d'impact est réalisé selon une de leurs caractéristiques, telles que leur échelle géographique ou leur domaine de protection principalement impliqué ; sinon les catégories d'impact sont hiérarchisées, généralement selon les priorités définies par les commanditaires de l'étude ; ce regroupement est par définition subjectif. Ces deux modes opératoires ne s'excluent pas l'un l'autre : les catégories d'impact peuvent être triées selon une caractéristique donnée et les classes ainsi définies hiérarchisées.

L'addition des scores de caractérisation est justifiée lorsque les catégories d'impact qui se réfèrent au même type de dommage ont été converties en une même unité, exprimant le dommage causé à l'environnement. Cette étape n'est en fait qu'un groupement permettant de clarifier la lecture et faciliter l'interprétation des résultats. Les groupes sont appelés « catégories de dommages ». Les catégories de dommages les plus communes sont celles des méthodes Eco-indicator 95 et IMPACT2002+ présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Catégories de dommages: exemple de la méthode IMPACT2002+

Catégorie de dommage	Catégorie d'impact
Human Health	Carcinogens ; Non-carcinogens ; Respiratory inorganic ; Ionizing radiation ; Ozone layer depletion ; Respiratory organics
Ecosystem quality	Aquatic ecotoxicity ; Terrestrial ecotoxicity; Terrestrial acidification /nitrification; Land occupation
Climate change	Global warming
Resources	Non-renewable energy ; Mineral extraction

2.3.3 Pondération : gradation des impacts:

Après l'agrégation, une étape supplémentaire, la pondération, peut être réalisée afin de mieux interpréter les scores normalisés. La normalisation souligne les effets qui sont fortement impactés. Cependant, il ne dit rien sur l'importance relative des effets environnementaux. Un petit effet peut très bien être le plus important. Une étape de pondération est alors utilisée pour parvenir à un résultat global : tous les effets sont désormais associés à une mesure de la gravité. Il existe une corrélation entre la gravité d'un effet et la distance entre le niveau actuel et le niveau souhaité.

La pondération consiste en la multiplication de chacun des résultats du profil environnemental par un facteur. Cette opération permet notamment une agrégation de l'ensemble des résultats d'impact de l'ACV sous la forme d'une valeur unique. Les résultats de la normalisation s'expriment sous la forme d'une unité commune, qui dépend du type de la référence retenue. Les facteurs de pondération sont alors généralement sans unité, et constituent l'expression quantifiée du classement, en termes de priorité, effectué au cours de l'étape de regroupement. La valeur de ces facteurs est généralement dérivée d'avis ou de sondage d'un panel, qu'il soit d'experts ou représentatif d'une population [Pennington'06].

Par exemple, la méthode suisse EcoPoints a fixé ses facteurs de pondération à partir des rapports gouvernementaux et des cartes détaillées de l'Europe dans lesquelles les problèmes environnementaux sont présentés avec un degré élevé de détails. Ces données ont été utilisées pour déterminer le niveau actuel d'un problème environnemental et par quel facteur le problème doit être réduit pour atteindre un niveau acceptable.

La pondération et l'agrégation accentuent à la fois les avantages et les inconvénients déjà présentés pour la normalisation, dans le sens où ces étapes améliorent encore la lisibilité des résultats, notamment dans le cas d'un grand nombre de catégories d'impacts prises en compte, au détriment de l'information fournie.

Toutefois, en regardant les origines de pondération, c'est une étape controversée dans la communauté scientifique. Le problème réside dans la détermination des facteurs de pondération. Régler des équivalents de ces niveaux de dommages est un choix subjectif qui ne peut être scientifiquement fondé et qui est souvent défini sur la base d'un compromis entre la faisabilité et l'opportunité.

3 Conclusion du chapitre 1

Si la prise en compte de l'environnement en conception de produits industriels est récente et peu répandue dans les pratiques des entreprises, les concepts d'écologie industrielle intègrent depuis quelques années ces principes. La conceptualisation des phénomènes mis en jeu est suffisamment approfondie aujourd'hui pour être absorbés par des processus industriels. L'élément central de cette rationalisation vient du fait que l'évaluation des impacts environnementaux générés par un produit a été rendue possible par le développement scientifique de la méthode d'analyse de cycle de vie. Cette méthodologie, certifiée par les organismes de référence, est ainsi de plus en plus utilisée par les entreprises qui cherchent à connaître les impacts réels de leurs activités avec une vision cycle de vie et non plus seulement centrée sur les sites de production.

Dans cette partie, nous venons de voir que l'entreprise peut trouver des solutions, dans les réglementations ou les travaux scientifiques, pour l'aider à intégrer l'environnement comme dimension de conception. La question qui se pose alors est de connaître le niveau de maturité du secteur microélectronique et d'en identifier les spécificités : il s'agira de s'assurer que les entreprises de ce secteur adoptent une approche proactive pour l'intégration de l'environnement en conception.

Chapitre 2 : Eco-conception de produits microélectroniques

Dans ce chapitre, nous essaierons de décrire les interactions entre l'industrie microélectronique et l'environnement, en se basant sur les spécificités du produit. Nous allons dans un premier temps décrire le produit microélectronique sur son cycle de vie et donc citer l'ensemble des liens entre l'entité « produit » et la dimension « environnement ». Suite à cette description, nous généraliserons les effets d'un produit sur l'environnement et décrirons en quoi le produit microélectronique a des spécificités rendant son éco-conception a priori un problème industriel complexe.

1 Produit microélectronique et environnement : interactions et spécificités

La Figure 5 décrit les phases du cycle de vie d'un composant. Les sections suivantes présentent dans le détail ces différentes phases.

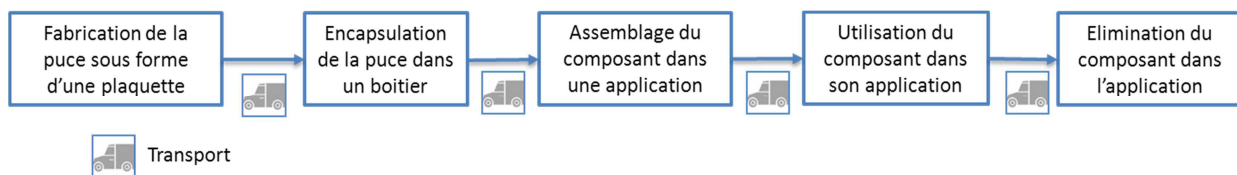


Figure 5 : Cycle de vie d'un composant microélectronique

Un produit issu de l'industrie microélectronique est le circuit intégré, appelé composant. Ce composant est un dispositif semi-conducteur, la puce, généralement encapsulé dans un boîtier. Nous serons amenés également à considérer un dispositif microélectronique, qui est un ensemble de plusieurs composants microélectroniques, actifs et passifs, connectés sur un circuit imprimé. Les produits microélectroniques, que l'on trouve sur le marché, sont issus majoritairement de technologies à base d'un substrat en silicium, auquel est appliqué une série de procédés de traitement de surface.

Le circuit intégré est un ensemble de dispositifs élémentaires, composants actifs et passifs, qui associés astucieusement permettent de délivrer une réponse à un signal d'entrée. Ces signaux sont la plupart du temps électriques mais peuvent être aussi optiques, énergétiques (chaleur) ou mécaniques. On peut associer son principe de fonctionnement au circuit imprimé sur lequel va être fixé un certain nombre de dispositifs élémentaires. Les composants passifs sont les résistances, capacités et inductances ; les actifs sont les diodes et les transistors. Le produit typique de cette industrie est un circuit intégré de technologie CMOS, qui peut être assimilé à un ensemble monolithique de plusieurs milliards d'éléments discrets sur un substrat de silicium.

Le transistor a constitué une invention déterminante sans laquelle l'informatique ne posséderait pas sa forme actuelle ; il a permis à la société de l'information électronique de se développer. En effet, le coût de production relativement faible des composants semi-conducteurs a rendu possible « l'électronisation » de nos sociétés modernes à travers les ordinateurs, téléphones portables et tous les autres appareils électroniques, devenus des éléments inextricables de nos vies. Les clients

historiques de l'industrie microélectronique sont l'informatique et l'électronique grand public, mais depuis quelques années, des objets plus communs intègrent des fonctions électroniques: machines à café, automobiles, cartouches d'encre, ampoules, applications médicales, etc. Le marché de la microélectronique est en pleine diversification, d'autant plus qu'un même composant peut être embarqué indifféremment dans divers équipements électroniques.

1.1 Fabrication

La fabrication est réalisée dans deux types d'usine ou lignes de production :

- les usines front-end, produisant et traitant les plaquettes de silicium, les « wafers », contenant plusieurs centaines, voire milliers, de puces ; à la fin du traitement, la plaquette est découpée pour séparer les puces les unes des autres.
- les usines back-end où est réalisé l'assemblage de la puce dans un boîtier. Ce boîtier encapsule et protège la puce des contraintes extérieures et permet de la connecter à une carte mère ou à un circuit imprimé.

Deux séries de tests élaborés sont réalisées sur les produits : l'EWS (Electrical Wafer Sort) sur les plaquettes sorties des usines front-end et un test sur les produits finis, à l'issue de l'assemblage. Ces tests peuvent avoir lieu sur des sites différents du lieu de production. Par ailleurs, les composants sont fabriqués avec un principe de double source : au moins deux sites sont qualifiés pour la fabrication, le deuxième site pouvant être celui d'un sous-traitant.

- Front-end : fabrication d'une technologie semi-conductrice

L'industrie du semi-conducteur est soumise à un phénomène appelé la loi de Moore, qui stipule que le nombre de transistors qui peuvent être placés sur un circuit intégré double environ tous les deux ans. Une génération de semi-conducteur est caractérisée par sa dimension critique, qui correspond à la longueur de la grille des transistors logiques. Cette dimension détermine le nœud technologique de la puce : on parle alors de « filière technologique ». Ainsi, le « nœud 40nm » correspond à la technologie où la dimension minimale mesure 40 nanomètres. Aujourd'hui, la génération de production la plus agressive est le nœud 22nm, fabriqué par Intel.

Le front-end est le traitement des plaquettes qui est effectué dans une usine, appelée « Wafer Fabrication Area ». Le processus de fabrication, appelé la route de fabrication, est une série d'opérations de traitement de surface, où l'on peut dénombrer jusqu'à plusieurs centaines d'étapes, divisées en plusieurs dizaines de niveaux de masques. L'Annexe 1-A décrit en détails les procédés de fabrication d'une puce. Le diamètre des plaquettes dans les usines de dernière génération est de 12 pouces, tandis que les plaquettes 18 pouces sont en évaluation. Une plaquette peut supporter jusqu'à plusieurs milliers de puces.

Le procédé de fabrication d'une puce sur une plaquette se schématise comme une série de boucles, où, pour chaque boucle, une couche est déposée sur la plaquette puis traitée pour former des structures sur le silicium. Chaque boucle, correspondant à un niveau de masque, comprend une dizaine d'étapes, débutant par une étape de photolithographie, et suivie par plusieurs procédés réalisés dans un ordre variable : gravure, nettoyage, diffusion, implantation ionique, dépôt, ou polissage mécano-chimique.

A chaque étape, de nombreuses mesures sont effectuées sur les plaquettes pour contrôler les paramètres, comme les tailles (épaisseurs, hauteurs) ou les performances électriques. L'EWS est réalisé à la fin de la fabrication afin de tester les fonctionnalités de chaque puce sur la plaquette. Pour se rendre compte de l'exigence environnementale de cette activité industrielle, les chiffres suivants peuvent être cités : pour une plaquette moyenne, en 2011 sur le site de l'entreprise STMicroelectronics de Rousset, ont été consommés 329 kilowattheures d'électricité par plaquette, 3.1 mètres cube d'eau et 3.6 kilogrammes de produits chimiques.

La fabrication des plaquettes a lieu dans un environnement extrêmement propre : l'air est plus d'un million de fois plus propre que l'air que nous respirons dans une ville. La concentration de particules en suspension dans la pièce est contrôlée de façon très précise.

Au vu de la complexité de la fabrication des puces, les infrastructures forment un système compliqué pour l'approvisionnement en matières premières, le traitement des déchets, la logistique ou encore les infrastructures électroniques et informatiques de suivi de production. Une usine front-end vaut plus d'un milliard de dollars, ce qui en fait une industrie très chère : le capital par mètre carré est plus important que pour toute autre industrie. La progression du coût des lignes de production répond à la loi de Rock, ou la seconde loi de Moore, selon laquelle ce coût augmente de 50% à chaque génération [Rupp'11].

- Back-end : phase de production du boîtier

Les puces sont généralement encapsulées dans un boîtier avant d'être intégrées dans un système électronique. Ce boîtier remplit trois fonctions principales (Figure 6):

- Fournir la connexion physique permettant à la puce d'être reliée au système dans lequel elle fonctionne;
- Assurer la protection physique de la puce contre la casse ou les rayures, les dommages des produits chimiques, de l'humidité ou de gaz ;
- Dissiper la chaleur générée par la puce pendant le fonctionnement.

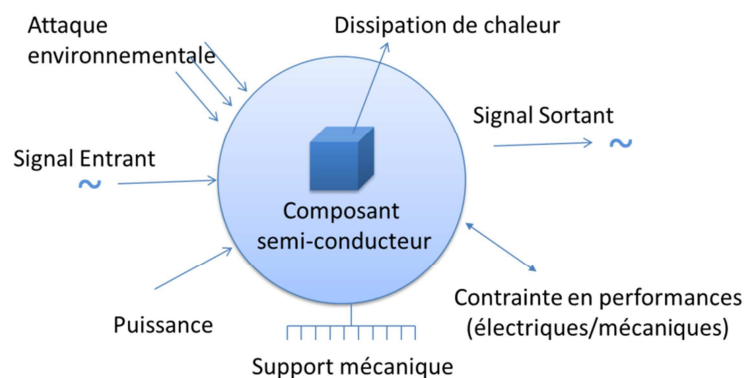


Figure 6 : Fonction du boîtier

La puce est assemblée dans le boîtier selon un processus d'une quinzaine d'étapes. Cette fabrication commence lorsque la plaquette en silicium, supportant les puces, est découpée pour former des puces individuelles et finit lorsque la puce est protégée et connectée au boîtier.

Bien que la complexité et les challenges techniques soient principalement attribuables aux activités de traitement du silicium, la conception du boîtier a une importance considérable sur la performance et la fiabilité du système final et le coût de production peut représenter une large part

du coût total de fabrication [Andrae'11]. Les feuilles de route technologiques sectorielles, décrite par l'ITRS⁶, tendent à réduire la masse et le volume du boîtier et aujourd'hui plusieurs puces peuvent être encapsulées dans le même boîtier. Ces feuilles de route conduisent les ingénieurs à imaginer des solutions innovantes, minimalistes et solides, pour des structures complexes et fragiles. La connaissance des performances environnementales du boîtier est donc aussi une question centrale pour l'industrie microélectronique. La masse de ce boîtier représente plus de 90% de la masse finale du composant et les principaux enjeux environnementaux ont pour l'instant concerné le boîtier lorsqu'il s'agissait d'éliminer des substances dangereuses pour répondre à des exigences réglementaires: le plomb, les retardateurs de flamme contenant du brome (BFRs) [Ekvall'05]. Selon [Higgs'09], le substrat du boîtier est le matériau de la chaîne d'approvisionnement le plus impactant si l'on considère l'impact sur le réchauffement climatique. En général, l'assemblage du boîtier est une activité extrêmement consommatrice de métaux, plastiques et composés organiques. Les procédés utilisés pour l'assemblage d'une puce dans un boîtier sont décrits en Annexe 1-B.

1.2 Utilisation

Un composant est neutre durant son utilisation, à l'exception de la consommation d'électricité et de rayonnement électromagnétique, notamment pour les produits radio fréquence (RF) qui utilisent des systèmes de communication sans fil. Le scénario standard d'utilisation d'un composant microélectronique est difficile à établir, du fait qu'un même composant peut être utilisé dans différentes applications et avoir plusieurs cycles d'usage. De plus, lorsqu'il est destiné à certaines familles de produits finis, le composant peut être soumis à des normes spécifiques. L'électricité consommée par la puce pendant son utilisation varie extrêmement selon l'application. On parle ainsi de différents scénarii applicatifs.

Pour illustrer ce propos, la Figure 7 présente différents cycle d'utilisation pour une même carte à puce, qui est être intégrée indifféremment dans une carte bancaire, un téléphone ou une télévision.

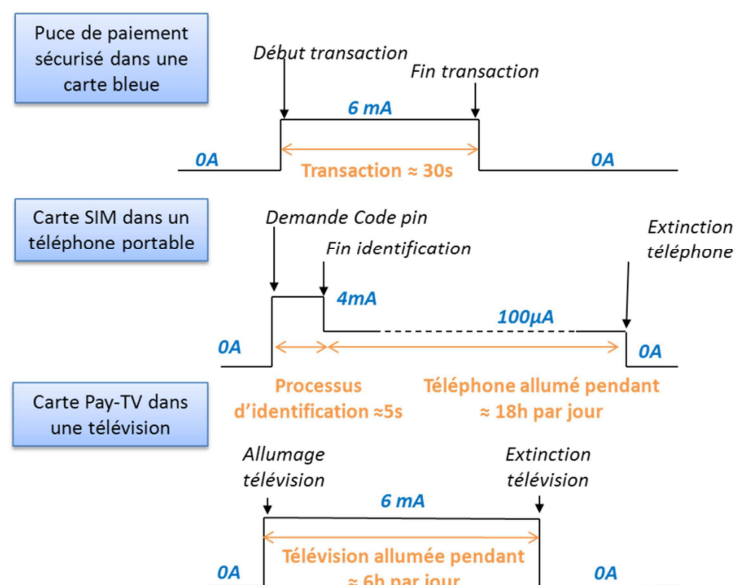


Figure 7 : Différents cycles d'utilisation pour un même produit

⁶ ITRS (International Technology Roadmap for Semi-conductors) <http://www.itrs.net/about.html>

En premier lieu, la durée de vie de l'application et donc du composant sont très différentes : 2 ans pour une carte bancaire, 4 ans pour un téléphone, 7 ans pour une télévision⁷. Ensuite, on observe que les cycles d'utilisation théoriques diffèrent.

La carte à puce a été conçue pour proposer deux niveaux de consommation électrique : 6 milliampères en mode normal (on) et 100 microampères en mode de basse consommation (stand-by). Cependant, ce deuxième mode n'est pas systématiquement utilisé. Pour la puce en téléphonie mobile, le circuit est soumis une norme ETSI contraignante qui spécifie que la consommation en stand-by doit être inférieure à 100 microampères. L'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) élabore des normes mondialement applicables aux technologies de l'information et des communications (TIC) c'est-à-dire pour l'ensemble des technologies fixes, mobiles, radios, radiodiffusion et internet. D'autre part, le volet 3 de la norme ISO7816, spécifique aux cartes à puce, impose d'autres restrictions sur la puissance des modes en fonctionnement.

La carte pour la télévision payante est directement connectée au secteur via une box : aucun effort n'est fait en conception pour limiter la consommation électrique de la carte, contrairement aux systèmes sur batterie.

Certains produits sont composés d'un ensemble de plusieurs composants, actifs ou passifs, synchronisés par des programmes logiciels : ils sont vendus comme une solution technique complète et fonctionnent comme un seul composant. La consommation énergétique de ces produits n'est pas la somme des consommations de chaque composant : il faut identifier les différents modes, les chronographes ainsi que le séquençage des tâches. Par exemple, pour une plateforme de commande intégrée dans un téléphone portable de type Smartphone, il a été défini plusieurs modes d'utilisation qui sont ceux spécifiés par le fabricant de téléphone : communication, lecture de vidéos, prise de vidéos ou de photos, navigation web, jeu, lecture de musique, recharge et stand-by. Il faut connaître la puissance de chaque mode et le temps moyen passé dans chacun par l'utilisateur final.

Ces deux exemples montrent en quoi la modélisation de phase d'utilisation d'un composant, par l'estimation de la consommation énergétique selon un cycle d'usage précis, n'est pas un problème trivial et doit être soumise à certaines hypothèses.

1.3 Distribution

On distingue dans cette partie plusieurs types de transport :

- le transport de matières premières dans la « supply chain » ;
- le transport du composant et de ses sous-systèmes (plaquette et boîtier) entre les différents sites de fabrication ou d'assemblage et jusqu'à la livraison au client ;
- le transport du composant dans son application finale.

Pour le deuxième point, comme dit précédemment, deux mêmes produits, vendus sous le même code, ont pu avoir des parcours très différents : les flux entre les sites de production pour les différentes activités (fabrication de la puce, activité sous-traitée, test, assemblage dans le boîtier) jusqu'au client final sont nombreux et variables.

⁷ Les temps d'utilisation sont notés à titre indicatif

1.4 Fin de vie

Après sa mise au rebut, le composant peut générer des contaminations de par la présence de métaux et de composés dangereux, comme le plomb utilisé dans les soudures. La gestion des composants en fin de vie et les procédés mis en œuvre peuvent être à l'origine de nouvelles problématiques environnementales quelle que soit la filière (recyclage, mise en décharge ou incinération) : procédés énergivores utilisés pour la récupération des métaux, émissions de composants toxiques dans l'air, lixiviation des métaux.

Pour [Cui'08], la hiérarchie « souhaitée », à des fins environnementales, de traitement des déchets électroniques est la suivante :

- la réutilisation de l'équipement électronique ;
- le re-manufacturing ;
- la récupération des matériaux par des techniques avancées de recyclage ;
- en dernier recours l'incinération ou la mise en décharge.

Nous reprenons cet ordre pour les déchets microélectroniques avec quelques remarques supplémentaires. Les composants sont des ensembles impossibles à désassembler sans dénaturer le produit. Il est donc impossible de les re-manufacturer. De plus, les composants intégrés dans les équipements électroniques sont rarement récupérés pour les traiter séparément car ils sont attachés à l'équipement et difficiles d'accès. Ils sont destinés à la filière de traitement de fin de vie de leur application finale.

Les trois scénarii de fin de vie sont les suivants : valorisation avec les DEEE, incinération, mise en décharge. Selon une enquête de l'association nationale des consommateurs et usagers (CLCV) sur la collecte des DEEE⁸ en France, entre 2006 et 2009, seuls 9% des DEEE émis pour les particuliers ont été collectés (contre 26% pour les entreprises du secteur informatique sur la période 2009-2010).

- [Recyclage des composants dans les filières de traitement des DEEE](#)

La Figure 8 présente le processus schématisé de recyclage des composants microélectroniques.

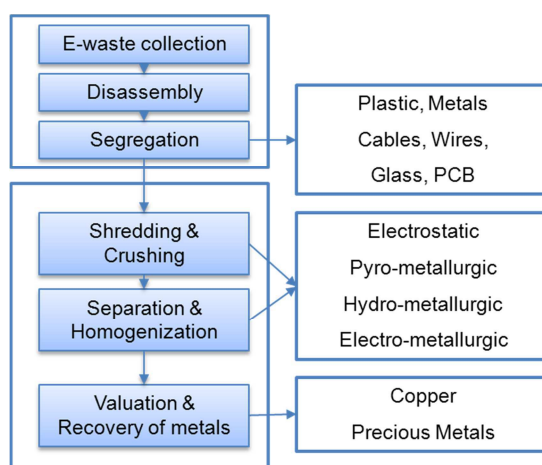


Figure 8 : Processus schématisé du recyclage des cartes électroniques

⁸ Source : GreenIT.fr, <http://www.clcv.org/enquetes-archivees/recyclage-des-appareils-electriques-et-electroniques-les-distributeurs-doivent-faire-plus-14-06-2011.html> ; Données : ADEME

Une grande variété de DEEE est collectée depuis les bureaux, maisons ou industries. Une fois collectés, les équipements sont démantelés manuellement. Certains éléments sont retirés: cartes, composants en verre, vis, câbles, pièces métalliques, radiateurs, pièces en plastiques, cartouches d'encre, disques durs, ventilateurs, transformateurs et batteries⁹. Ces sous-éléments sont triés afin d'être traités dans des chaînes de recyclage ou de valorisation adaptées.

Les cartes électroniques et les composants électroniques sont envoyés vers des usines de fonderie et d'affinage intégrés pour le cuivre et les métaux précieux. Ces pièces sont mélangées avec d'autres matériaux contenant des métaux précieux comme des catalyseurs, déchets industriels et coproduits issus d'industries non-ferreuses (automobile, pétrochimie). Plus de 200 types de matériaux sont traités dans ces filières. Le Tableau 2 présente la composition moyenne d'une carte mère d'ordinateur.

Tableau 2 : Composition moyenne d'une carte mère d'ordinateur [Hagelüken'06-a]

Composition	Masse (en %)
Plastique	23%
Cuivre	20%
Verre	18%
Fer	7%
Aluminium	5%
Etain	2.9%
Plomb	1.5%
Nickel	1%
Autres (Composés organiques)	22%
Or	250 ppm
Argent	1000 ppm
Palladium	110 ppm
Arsenic, Antimoine, Barium, Brome, Bismuth	Traces

Les déchets sont broyés pour former des morceaux de quelques centimètres. Les morceaux sont vendus à des fonderies, qui sont pour la plupart des sociétés accréditées. Ces fonderies ont les technologies et infrastructures permettant d'extraire des métaux mélangés à d'autres matériaux.

Etant donné que c'est la teneur en métaux précieux qui fait sa valeur, la valeur marchande des fractions de cartes électroniques est très variable. Une fois vendus aux fondeurs, les morceaux sont concassés par des broyeurs à boulet puis les matériaux sont pulvérisés avec des techniques d'enrichissement. Ces procédés ont pour but à la fois de séparer les contaminations contenues dans les métaux et d'extraire les particules métalliques contenues dans des pièces plastiques.

Des procédés électrostatiques sont utilisés pour séparer le plastique et les métaux. D'autres morceaux métalliques sont séparés par gravité. Le fer, le nickel et le cobalt sont séparés par des procédés magnétiques. L'aluminium est isolé par des courants de Foucault.

⁹ <http://www.ecyclerecovery.com.au/index.htm>

Traditionnellement, après ses procédés plutôt grossiers, les opérations sont des procédés thermiques et pyrométallurgiques notamment. Les matériaux sont fondus dans un fourneau à haute température : les composés organiques sont brûlés et convertis en énergie. Se forment alors des scories : ce sont des déchets solides provenant des opérations de traitement des minéraux métalliques ou de l'affinage des métaux. Ces scories surnagent le métal en fusion.

L'extraction des métaux précieux des scories est réalisée grâce à d'autres techniques, telles que des procédés pyrométallurgiques [Park'09], différents lessivages, opérations d'électro-winning, hydro-métallurgiques et électrométallurgiques. Ces opérations sont utilisées dans différentes combinaisons afin d'assurer une récupération optimale des métaux. Umicore annonce un taux de récupération d'or autour de 95% [Hagelüken-b'06]. Etant donné que même les scories peuvent être revendues comme matériau de construction, moins de 5% de la matière entrante est convertie en déchet ultime [Hagelüken'06-b]. Selon [Chatterjee'09], pour une tonne de cartes électroniques, 364 kilogrammes de métaux sont récupérés (Tableau 3).

Tableau 3 : Masse de métaux récupérés dans 1 tonne de cartes électroniques

Métaux	Masse
Or	280 g
Cuivre	191 kg
Métaux précieux (Pt, Pd, In)	93 g
Aluminium	145 kg
Plomb/Étain (Pb/Sn)	31 kg
Argent	450 g

Bien que tous les métaux et matériaux organiques contenus dans les composants électroniques puissent être récupérés avec des processus adaptés, il existe des éléments appelés délétères, qui rendent les processus de récupération plus lents, plus complexes ou moins efficaces. Ces éléments quand ils sont présents impliquent des pénalités de paiement. En effet, ils sont systématiquement liés à des coûts supplémentaires (températures plus élevées, produits chimiques plus concentrés).

Par exemple, les halogènes sont corrosifs et des oxydes dont le point de fusion est élevé, requièrent une température de fusion plus importante causant une usure prématurée des fourneaux. D'autres pénalités doivent être payées quand la concentration de certains produits chimiques est trop importante : chlore (corrosif), mercure (traitements spécifiques), alumine (production augmentée de scories), antimoine et bismuth (limitations des procédés).

Les recycleurs sont confrontés à des difficultés techniques liées notamment au mélange de métaux, de divers composés organiques et résines dans les circuits et au traitement des substances toxiques et dangereuses contenues dans les déchets tout en respectant des normes environnementales. Un système efficace de traitement des émissions gazeuses en sortie des fours est nécessaire pour traiter la formation de COV, dioxines ou gaz acides issus des substances organiques présentes dans les déchets traités, ainsi que de poussières. La détection des substances dangereuses est du ressort du fondeur, d'où la nécessité de bonnes analyses préliminaires [Lehner'03]. Les substances sensibles sont agglomérées (plomb, antimoine, arsenic) ou récupérées et stabilisées avec des techniques respectueuses de l'environnement (mercure, béryllium, cadmium).

Un tel processus assure un excellent taux de récupération des métaux précieux contenus dans des formes complexes de déchets électroniques. Le recyclage de ces déchets est un entreprise rentable dans les pays développés rien que du fait de la présence de métaux précieux [Chatterjee'09]. Les recycleurs réapprovisionnent le marché avec 17 métaux: or, argent, palladium, platine, rhodium, iridium, cuivre, plomb, ruthénium, nickel, étain, bismuth, indium, sélénium, tellurium, antimoine et arsenic. Pour illustrer l'importance de cette filière, environ 25% de la production annuelle d'or et d'argent et 65% de palladium et de platine sont issus du recyclage de déchets électroniques.

Ces infrastructures intégrant à la fois fonderie et affinage des métaux existent en Belgique (Umicore), Canada (Xrtata), Allemagne, Japon et Suède (Boliden). On trouve également ce type de fonderies dans des pays en développement (Chine, Inde, Afrique du Sud). Cependant, leurs infrastructures devraient être modernisées en prenant des mesures supplémentaires pour la protection de l'environnement, notamment en installant des systèmes appropriés de traitement des émissions gazeuses et de gestion des eaux usées. C'est d'autant plus le cas pour traiter des matériaux avec une forte teneur en matières organiques et halogènes, comme les circuits imprimés.

- Incinération

Selon [Cui'08], « l'incinération de déchets électroniques dans des incinérateurs municipaux (...) est dangereuse ». En effet, le cuivre qui y est contenu, est un catalyseur pour la formation de dioxine quand des retardateurs de flamme sont incinérés. C'est un problème notamment lors de l'incinération des BFR à basse température. Un rapport de l'Union Européenne¹⁰ estime que les incinérateurs ont émis 36 tonnes par an de mercure et 16 tonnes de cadmium en Europe.

Un arrêté de 2002¹¹, fixant des normes d'émissions contraignantes aux incinérateurs, régleme une vingtaine de polluants (dioxines et furanes, neuf métaux lourds) sur plus de 2000 molécules mesurées en sortie de cheminée. L'évolution de la composition des biens de consommation, et donc des déchets, introduit de nouvelles substances potentiellement toxiques.

- Mise en décharge

Comme on le voit dans les statistiques françaises sur le traitement des déchets¹², encore 13% des DEEE domestiques sont mis en décharge, contre 7% des DEEE industriels. Les pollutions engendrées par ces centres d'enfouissement techniques, et leurs impacts sanitaires et environnementaux sont difficiles à déterminer avec certitude car ils sont diffus dans le temps et dans l'espace. Plusieurs polluants interagissent dans des milieux naturels différents (air, sol, eau etc.) sur le long terme. Les liens de causalité entre les pollutions liées aux décharges et des maladies ou des modifications significatives de l'environnement sont difficiles à établir.

Les bio-déchets stockés dans la décharge libèrent l'eau qu'ils contiennent. Ces jus, auxquels se mêlent les eaux de pluie, qui percolent depuis la surface sont appelés lixiviats. Ils concentrent les

¹⁰ EC, Draft proposal for a European parliament and council directive on waste electrical and electronic equipment, European Commission (EC) Report, Brussels, Belgium, 2000.

¹¹ Arrêté du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux, JORF n°280 du 1 décembre 2002 page 19778, texte n° 10, NOR: DEVP0210351A

¹² ADEME Chiffres Clés Déchets - Edition 2012

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=83366&p1=00&p2=05&ref=17597>

polluants et substances toxiques contenus dans les déchets mélangés, notamment les métaux lourds. En moyenne la concentration de Sn, Pb, Zn et Sb dans les fractions plastiques des déchets électroniques est supérieure à 1000 mg/kg ; pour le Cd, la concentration est supérieure à 100 mg/kg. On peut noter que la combustion des déchets en incinérateur n'est pas totale : pour 1000 tonnes de déchets brûlés, environ 300 tonnes de résidus solides, les mâchefers, sont recueillis à la base du fourneau. Ils sont refroidis et envoyés en centre de stockage. Cette incinération préalable à la mise en décharge provoque une augmentation de la mobilité des métaux lourds, en particulier du plomb, augmentant les effets de lixiviation.

Certains centres de stockage ne sont pas équipés de membranes de protection au fond des casiers, les lixiviats peuvent pénétrer directement dans le sol et rejoindre une nappe phréatique, polluant ainsi la ressource en eau. Certaines décharges possèdent une membrane de protection disposée dans le fond des casiers, qui peut limiter la pollution des sols par les lixiviats au début de la vie de la décharge. Cependant, sur le long terme, il existe un risque élevé de pollution car les matériaux synthétiques ont une durée de vie et d'efficacité limitée.

2 Tendances naturelles et feuilles de route en microélectronique : des effets naturellement positifs pour l'environnement ?

Jusqu'à présent, le secteur microélectronique a répondu à la pression extérieure et aux demandes relatives à la performance des produits, sans changement particulier dans ses feuilles de route. Trois éléments ont permis jusqu'alors à l'industrie microélectronique de ne pas être considérée comme « sale » par les autres industries et le grand public : la réduction de la taille des circuits, la mise en œuvre de programme pour la réduction de la consommation énergétique et l'application de la directive européenne RoHS.

2.1 Effets de la miniaturisation

La loi de Moore se matérialise directement par la réduction par deux de la taille des circuits tous les deux ans. Cette tendance induit un effet bénéfique sur l'environnement car il y a plus de puces par plaquette. Par ailleurs, les feuilles de route technologiques préconisent la réduction de la masse et du volume du boîtier et aujourd'hui plusieurs puces peuvent être encapsulées dans le même boîtier.

Cette miniaturisation n'a-t-elle aucune contrepartie ? Si. La fabrication de telles structures miniatures requiert un environnement de production de plus en plus propre et des procédés de fabrication plus complexes et plus longs. Selon [Schischke'04], « shrinking dimensions raise production environment requirements ». En effet, la manipulation des plaquettes nécessite un environnement de plus en plus propre pour éviter des pertes de rendements. Cela implique un usage intensif d'électricité pour le chauffage, la ventilation et les systèmes d'air conditionnés, ainsi qu'une extrême qualité d'eau ultra-pure. Selon [Harland'07], chez Intel au début des années 90, le passage des plaquettes de 150 mm de diamètre à 200 mm, les émissions environnementales ramenées à la surface de silicium ont été multipliées par 2,5.

L'évolution des infrastructures requises pour un environnement de production ultra-pur se traduit par la classe des chambres blanches. Ces niveaux de classe sont définis par l'ISO14644-1 : il existe des seuils de concentrations particulières par unité de volume pour différents types de

particules classés en fonction de leur taille. Par exemple, pour les particules de moins 0.1 micromètre, les seuils sont :

- Classe ISO 3 / Classe 1 : moins de 1000 particules par mètre cube
- Classe ISO 4 / Classe 10 : moins de 10000 particules par mètre cube
- Classe ISO 5 / Classe 100 : moins de 100000 particules par mètre cube
- Classe ISO 6 / Classe 1000 : moins de 100000 particules par mètre cube
- Classe ISO 7 / Classe 10000 : pas de seuil limite

Les prédictions de l'IPC National Roadmap¹³ sur les environnements ultra-purs des salles blanches et l'évolution des niveaux de classe sur les générations successives d'usines sont les suivantes : classe 10000 en 2002/2003, classe 1000 en 2004/2007 et classe 100 en 2008/2012. Selon [Tschudi'00], les systèmes d'air conditionné (HVAC) dans les salles blanches sont à l'origine d'une consommation accrue d'électricité plus l'environnement de la salle est pur : 2280 kWh/m² pour une classe 10.000, 4330 kWh/m² pour une classe 1000, 8440 kWh/m² pour une classe 100.

L'ambiance ultra-pure de la salle blanche, extrêmement consommatrice d'eau, d'électricité et de produits chimiques, est responsable d'une grande part de la pollution attribuable à un produit [Boyd'10]: selon un rapport du Lawrence Berkeley National Laboratory (2000)¹⁴, les équipements de production représentent seulement 35% de la consommation d'électricité.

Par ailleurs, d'une génération de technologie à une autre, avec la réduction des dimensions critiques des circuits, on observe une complexification du procédé de fabrication.

D'une part, le nombre de masques, et ainsi le nombre d'étapes de fabrication, est en constante augmentation. Selon l'ITRS¹⁵, les technologies compteront jusqu'à 32 niveaux de masque en 2016 contre 25 en 2001. Chaque fois qu'une ligne de connectivité est dessinée par les concepteurs du circuit, elle se traduit par le rajout d'une vingtaine d'étapes élémentaires: dépôt et gravure d'une couche d'un oxyde diélectrique, dépôt et gravure d'une couche de titane, photolithographie de la ligne, formation de la ligne et du via.

D'autre part, à chaque fois qu'une option supplémentaire est embarquée, elle est liée à l'ajout de niveaux de masques. Par exemple, aujourd'hui de nombreux types de transistors sont embarqués dans la même technologie nécessitant la formation de nombreux caissons par implantation ionique.

Pour réduire les pitches de connexion et encapsuler des circuits intégrés de plus en plus denses, la fabrication des boîtiers requiert aujourd'hui également un environnement propre et l'utilisation de matières premières plus sophistiquées. Par exemple, les substrats sont maintenant des ensembles complexes, comprenant pour les plus récents jusqu'à six lignes pour des pitches de quelques centaines de micromètres. La fabrication de tels substrats est très énergivore.

La complexification a une empreinte environnementale considérable pour deux raisons : directement car on rajoute des étapes de fabrication, et indirectement car les temps de cycle sont augmentés et l'utilisation des infrastructures de la salle blanche est plus importante par plaquette.

¹³ IPC National Technology, *IPC National Technology Roadmap – Electronic Interconnections* - 2011

¹⁴ *Energy Efficiency in Semiconductor Cleanrooms: A Technical Perspective*, Lawrence Berkeley National Laboratory, <http://ateam.lbl.gov/cleanroom/technical.html>

¹⁵ International Technology Roadmap for Semiconductor, *Process Integration, Devices, and Structures*, Edition 2011, <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011PIDS.pdf>

2.2 Réduction énergétique des circuits

Au niveau du circuit électrique, les équipes de conception doivent faire face à la fois à un contexte législatif plus marqué ainsi qu'à des clients de plus en plus exigeants sur les performances électriques des composants et notamment sur les puissances engagées dans les modes de veille ou pour les technologies nomades (sur batterie).

On assiste ainsi à des changements de pratiques, qui devraient contribuer considérablement à la diminution de l'impact pendant la phase d'utilisation. Les efforts de conception sont conjoints à la conception du circuit et sa fabrication et ont pour objectif l'optimisation du transistor indépendant ou d'entités du circuit (SRAM, Flash). Par ailleurs, la réflexion porte sur les consommations dynamique et statique. Même inactifs, les transistors consomment de très faibles courants dits courants de fuite ou statiques, inhérents à leur conception (fuite au travers de l'oxyde de grille, abaissement des barrières de potentiel pour des tensions de grille ou de drain fortes...).

La recherche de faibles consommations d'énergie requière de travailler à la fois sur les consommations passive et actives. Plusieurs approches sont envisagées pour limiter la consommation des circuits en fonctionnement dans l'application au niveau de la conception :

- limiter la consommation passive par la mise en veille des parties du circuit qui ne travaillent pas. Ainsi, le concepteur est amené à mettre en sommeil, voire arrêter totalement certaines fonctions.
- modifier la tension d'alimentation par logiciel en fonction de la fréquence de cadencement de l'horloge afin de minimiser la consommation dynamique.
- utiliser des bibliothèques basées sur des transistors avec différentes tensions de seuil. Les concepteurs utilisent des cellules rapides à fortes fuites sur les chemins critiques et des transistors avec des largeurs de grilles relâchées pour minimiser les fuites. La définition d'un transistor à forte tension de seuil permet d'obtenir des modes « basse consommation » (faible contribution des fuites de grille et jonction).
- réduire des consommations passives et actives en réduisant les courants de fuite du transistor. Ces courants de fuites sont notamment le courant de grille, le courant OFF du transistor, le courant tunnel bande à bande au niveau du drain du transistor et le courant inverse de la diode. Diminuer la valeur de ces courants parasites implique un travail sur les technologies de fabrication des transistors (matériaux de grille, isolant de grille, dopage, énergie d'implantation des dopants, orientation du substrat, contrainte mécanique agissant sur la mobilité des porteurs...) et sur l'architecture du transistor (profil de dopage des drains/sources, forme des espaceurs...).

Bien que permettant d'atteindre les objectifs de consommation, ces approches ont généralement un coût en surface de silicium et un impact sur la performance.

2.3 Exemption de substances dangereuses et toxiques : application de la directive RoHS

L'application de la directive RoHS contribue à diminuer les impacts des composants sur la santé humaine. Cette directive oblige les fabricants à bannir et/ou restreindre l'utilisation de métaux lourds (plomb, mercure, cadmium...) ainsi que des composés bromés (PBB et PBDE).

Les entreprises du secteur ont ainsi l'obligation d'enlever des produits et des procédés de fabrication environ 1600 substances, en accord avec les législations mondiales et les demandes

spécifiques de clients. De nombreuses solutions techniques ont dû être imaginées pour s'affranchir de l'utilisation de ces substances. Le plomb contenu dans les soudures a donné lieu à de nombreux brevets liés au développement de trois nouvelles technologies sans plomb : nickel/palladium/or, étain pur et étain/argent/cuivre.

Le bénéfice environnemental lié à la mise en conformité avec RoHS n'est pourtant pas assuré. De nombreuses études sur le passage aux soudures sans plomb ont été réalisées et publiées. [Ekvall'05] montre que cette évolution permet de réduire les émissions de plomb mais augmente le phénomène de réchauffement climatique, via l'indicateur GWP (Global Warming Potential). Pourtant lorsqu'on regarde ce changement au niveau « système » ou « filière », le changement serait positif : la réduction des émissions de plomb s'avère importante, tandis que l'augmentation du GWP sur le cycle de vie des soudures serait contrebalancée par l'effet positif sur le GWP de l'utilisation de batterie, représentant un usage alternatif des ressources en plomb.

3 Analyses des freins pour l'éco-conception d'un composant du fait de ses spécificités

Nous allons décrire, dans cette section, les spécificités de ce produit qui sont des freins à la mise en œuvre d'analyse environnementale ou de méthodes d'éco-conception traditionnelles, jusqu'à parfois les rendre incompatibles.

3.1 Complexité de la fabrication et matérialisation secondaire

La communauté scientifique exprime des inquiétudes quant à la réalisation d'ACV pour le secteur microélectronique car la qualité des analyses environnementales est fortement dépendante de la qualité des données d'entrée.

La complexité sans cesse croissante des composants est un obstacle majeur pour l'inventaire du cycle de vie (ICV) lié à la phase de fabrication du fait des nombreuses incertitudes [Schischke'04]. Notamment, l'impact environnemental de l'utilisation d'une salle blanche, non négligeable sur le bilan énergétique de la fabrication d'un produit, est difficilement allouable à la production d'un seul produit car les fonctions de répartition ne sont pas triviales [Baudry'12]. La plus importante spécificité tient au fait qu'un grand nombre de matériaux secondaires, ne restant pas sur le produit fini, est utilisé pendant la fabrication. Pour illustrer ce propos, le Tableau 4 montre la différence de la masse d'énergies fossiles utilisées pour la fabrication et de la masse finale de trois composants (mémoires) et d'autres produits manufacturés.

Tableau 4 : Ratio entre la masse du produit et la masse de matières fossiles utilisées pour la fabrication

Source	Produit	M(EF)*	M(P) **	M(EF)/M(P)
Cas d'étude industriel	Mémoire 16-bit MCU	243 g	1.0 g	245
	832 KB Flash 68 KB RAM			
	Mémoire EEPROM 512 Kbit	14 g	0.31 g	452
[Williams'04]	Mémoire 32MB DRAM	1.2 g	0.002 g	600
	Automobile	1000 kg	1200 kg	0.83
	Réfrigérateur	53 kg	35 kg	1.5

*M(EF) : Masse des énergies fossiles utilisées pendant la fabrication / **M(P) : Masse du produit

Un circuit intégré est complexe à modéliser pour réaliser une ACV car un champ d'application spécifique est nécessaire, différent de celui établi pour des produits conventionnels. [Williams'02] a

développé le concept de la matérialisation secondaire. C'est la proposition que «des produits plus en plus complexes exigent des matériaux secondaires supplémentaires et de l'énergie pour atteindre leur forme d'entropie la plus faible». En d'autres termes, le modèle pour un circuit se concentre sur les matières secondaires utilisées lors de la fabrication plutôt que sur sa structure ou sa composition.

Le développement des systèmes d'information pour la collecte de données peut être utile pour supporter la réalisation de l'étape d'ICV. En pratique, des systèmes de type ERP¹⁶ ou PLM¹⁷ contiennent l'ensemble des données requises pour l'ICV de la phase de fabrication, avec les données du produit, la nomenclature (BOM¹⁸), et les données de production. L'état de l'art des méthodologies existantes pour intégrer l'ACV dans des systèmes ERP et PLM montre que de nombreux auteurs ont développé des prototypes, de sorte que les outils nécessaires pour soutenir une utilisation généralisée de l'ACV par l'industrie existent déjà. On peut toutefois noter qu'ils sont fragmentaires et aucune méthode ne s'impose aujourd'hui comme un standard. Cependant, la communication entre les logiciels PLM, ERP et d'ACV devrait marquer un tournant pour la mise en œuvre systématique de l'ACV en industrie. Tandis que le développement de ces systèmes est souvent conseillé pour systématiser la collecte de données, leur utilité dans l'industrie microélectronique est limitée : la nomenclature souvent utilisée pour la réalisation d'ACV-simplifiée est restrictive pour la microélectronique car la plupart des matériaux ne restent pas sur le produit.

En conclusion, la résolution du problème de collecte de données pour l'ICV par la structuration des systèmes d'information de l'entreprise, ERP et PLM, si elle est commune à toutes les entreprises, semble devoir largement progresser pour une entreprise du secteur microélectronique.

3.2 Taille du produit

Les dimensions micrométriques du produit est un frein à l'intégration de l'éco-conception car les paramètres de conception sont spécifiques à ce secteur d'activité, rendant certaines méthodes existantes largement utilisées dans d'autres industries, plus difficilement transposables.

Les règles de DfX sont des outils permettant d'évaluer le produit sur des aspects environnementaux ciblés, comme les matériaux et leur contenu énergétique, la possibilité de désassembler le produit en vue de le recycler. Certaines règles sont inappropriées au produit microélectronique en raison de ses dimension micrométrique : démontage, entretien, réutilisation [De Grave'06]. D'autres aspects DfX ne sont pas applicables en raison de techniques de fabrication qui transforment des unités mixtes en ensemble homogène (interconnexions par fusion) et ainsi tout recyclage par séparation devient alors difficile voire impossible.

3.3 Produits intermédiaires : variabilité de scénarios d'usage

La fonction exacte d'un produit n'est pas aisément définissable, et donc la modélisation de la phase d'utilisation n'est pas immédiate. La définition de l'unité fonctionnelle est nécessairement

¹⁶ L'acronyme ERP (*enterprise resource planing*) désigne un système intégré permettant à l'entreprise de standardiser son système d'information, d'automatiser et de relier ses processus d'affaire.

¹⁷ Le concept de PLM (*Product Lifecycle Management*) a pour ambition d'aller au-delà des aspects liés à l'ingénierie des produits pour promouvoir une plateforme partagée pour la création, l'organisation et la diffusion de savoirs reliés au produit à travers l'entreprise étendue.

¹⁸ 'bill of materials' : nomenclature des produits spécifiant leur composition massique

soumise à des critères subjectifs. En effet les produits sont des produits intermédiaires intégrés plus tard dans des applications « grand public » (automobile, téléphones portables...) ou dans des applications industrielles. L'acheteur du composant est souvent différent du vendeur ou distributeur de l'application finale dans laquelle est vendu le produit. Par ailleurs, le niveau élevé d'intégration de fonctionnalités dans le produit final rend difficile la définition exacte de la fonction d'un produit et ainsi la comparaison des fonctionnalités de plusieurs microsystèmes.

Les concepteurs doivent faire face à une intégration croissante de fonctions, associée à de nouveaux principes physiques : optique pour certains capteurs, rayonnement avec des systèmes RF (radio fréquence) ou mécaniques avec les MEMs. Certains produits sont entièrement dédiés à un secteur industriel (une solution pour la gestion de l'alimentation des téléphones portables). Au contraire, d'autres produits, comme des capteurs ou des microcontrôleurs, sont utilisés indifféremment par divers secteurs d'activité.

Ainsi, à la fois, l'utilisateur final, par son comportement, et le client ont une incidence sur le mode d'utilisation de l'application et donc sur l'impact du produit pendant son utilisation. L'intégration de scénario d'utilisation en conception, à des fins d'éco-conception, est donc soumise à des incertitudes importantes car la prédiction de l'impact de la phase d'utilisation est incertaine.

4 Conclusion du chapitre 2

Le produit issu de l'industrie microélectroniques est un produit très spécifique pour lequel, à première vue, l'intégration de la dimension environnementale ne représentera pas un problème simple : du fait de sa structure physique et de son positionnement comme produit intermédiaire dans la chaîne d'assemblage des produits grand public, l'empreinte environnementale d'un composant microélectronique est un aspect méconnu et rarement soulevé. Les feuilles de route naturelles du secteur ont été longtemps suffisantes pour répondre à la pression extérieure.

Cependant du fait de techniques de fabrication perfectionnées et consommatrices de produits chimiques, d'eau et d'électricité, la caractérisation environnementale de ces produits donne aujourd'hui lieu à des questionnements, en vue d'en diminuer les impacts. A ce stade, les singularités identifiées rendent difficile toute conclusion valable pour l'ensemble du secteur et gênent le développement des analyses environnementales.

Toutefois, il semble qu'avec l'avènement des modes de pensées « cycle de vie », la responsabilité environnementale d'une entreprise produisant des composants microélectroniques soit mise en avant. Ainsi si cette partie nous a permis de formuler l'existence de d'entraves liées au produit lui-même, l'étape suivante est donc d'essayer de comprendre quelle sont les motivations et la maturité du secteur d'activité en général vis-à-vis de l'éco-conception de ces produits.

Si nous venons de voir que l'éco-conception d'un produit microélectronique soulève des interrogations quant à sa faisabilité, il s'agit maintenant de comprendre quelle sont les motivations réelles pour une entreprise de ce secteur à s'engager dans une telle démarche. Les questions qui se posent sont les suivantes : « l'intégration de l'environnement en conception est-elle une réalité industrielle ou une pratique émergente? », « comment se positionnent les entreprises du secteur microélectronique sur ce sujet? ».

Chapitre 3 : Quels sont les enjeux de l'éco-conception pour un fabricant de composants?

1 Contexte de la thèse : programme d'éco-conception de STMicroelectronics

Une analyse du contexte de l'entreprise STMicroelectronics, et de l'initiation de son programme d'éco-conception, permet de comprendre quelles sont les raisons ayant motivé cette entreprise, au même titre que les autres entreprises du secteur microélectronique, à s'engager dans une politique intégrée des produit. L'analyse du contexte est liée à l'observation des clients, fournisseurs, actionnaires, associations d'entreprise, lobbies, agences de notation extra-financières, pressions législatives, économiques et toutes les parties prenantes indirectes comme les utilisateurs finaux et les ONG.

Le secteur microélectronique s'est engagé dans des programmes d'éco-conception, pour les mêmes raisons que les autres secteurs, que nous détaillerons ci-après: anticipation sur l'évolution des législations, réalisation de bénéfices économiques et commerciaux par le développement de solutions d'entreprise durable, développement d'un avantage compétitif par le biais de l'innovation. Aujourd'hui, la plupart des entreprises ont initié des démarches d'éco-conception¹⁹. Dans le secteur de l'industrie microélectronique, une revue des principaux acteurs permet de confirmer cette formule.

La stratégie environnementale de STMicroelectronics a été alimentée par la volonté de réduire les impacts environnementaux des activités, ce qui signifie contrôler les émissions vers l'environnement et l'utilisation de ressources. Au cours des décennies précédentes, l'accent a été mis sur des solutions «bout de chaîne», comme l'acquisition d'équipements pour le filtrage ou l'abattage visant à réduire la quantité d'émissions nocives et les substances libérées par les infrastructures. Ainsi, la plupart des efforts et investissements sont concentrés sur la fabrication pour diminuer l'impact des installations.

Toutefois, depuis 1994 et après sa révision en 2010, le Décalogue, document donnant dix objectifs et leviers d'actions pour les sites visant à l'amélioration des performances environnementales de l'entreprise, aborde la notion d'analyse de cycle de vie (§7.0).

Extrait du nouveau Décalogue (2010) Point 7.0 : PRODUCTS & PROCESSES

7.1: Design products for decreased energy consumption and for enablement of more energy efficient applications (...).

7.2: Develop and manufacture products and processes, responsibly managing their potential social, EHS impacts, establishing Eco-tools (Life Cycle Assessments, Eco-Profiles...). (...)

7.4: Have 100% of our new products "eco-designed" by 2015.

L'approche « life cycle thinking » suivie par les prémisses d'une politique intégrée des produits a pour but de faire partie intégrante de la stratégie environnementale de l'entreprise. Sous l'impulsion

¹⁹ Selon un rapport de La Financière Responsable, en 2010 70% des entreprises du CAC40 ont une démarche d'éco-conception pertinente contre 30% en 2006 (www.lafinanciereresponsable.fr)

de son premier PDG, Pasquale Pistorio, l'entreprise a prouvé son engagement par des actions ponctuelles. Dans les années 90, les communautés de conception sont initiées au « low energy conscious design », une approche visionnaire pour une industrie en plein essor ; les produits dédiés au « power management » sont aujourd'hui une des vitrines de la société. De plus, STMicroelectronics lance des produits labellisés Eco-Pack (puis Eco-Pack 2), ne contenant pas de substances dangereuses, bannies plus tard par la directive RoHS. Pendant ces années, des études occasionnelles ont été réalisées. En 2004, une ACV avait été effectuée grâce à un partenariat entre CODDE - distributeur d'un logiciel d'ACV dédié aux industries électriques et électroniques - et le SITELESC, syndicat des entreprises du semi-conducteur. Cette étude utilise des données de plusieurs sites et de produits différents. Malgré des lois d'allocation ne permettant pas de remonter réellement à l'impact d'un produit unitaire, cette étude donne des résultats génériques et sectoriels montrant que les impacts environnementaux de l'industrie microélectronique sont loin d'être négligeables par rapport à d'autres secteurs d'activités.

Plus tard, sous l'impulsion des clients, des agences de notation et des ONG, plusieurs ACV ont été réalisées sur différents produits en 2009. Les principaux clients du secteur TIC²⁰, comme Nokia, HP ou Apple, ont publié des résultats d'ACV. Des informations sur les composants viennent compléter les résultats obtenus. Ainsi, la première étape du programme est de répondre aux clients concernant des demandes spécifiques sur des ACV de produits : une procédure interne d'ACV est disponible.

STMicroelectronics s'est donné comme objectif « 2015, 100% des nouveaux produits, éco-conçus » et le communique depuis 2010 à l'extérieur via son rapport annuel²¹. Les travaux de thèse ont ainsi débuté dès l'annonce officielle du programme, avec pour objectif de contribuer à la création d'une expertise interne en éco-conception.

2 Eco-conception en entreprise : réalité ou green-washing ?

L'expression « green-washing » se réfère à l'orientation des actions marketing que donnent les entreprises sur un positionnement écologique : certaines entreprises investissent dans des campagnes de communication visant à « blanchir » leur image. Si ce phénomène est largement reconnu et identifié dans les pratiques industrielles, des études approfondies des pratiques des entreprises permettent de démêler le vrai du faux.

En 2002, [Abrassart'02] affirmait que « le concept de POEMS²² [...] est une coquille vide sans véritable référence à des pratiques réelles », et que « la floraison des discours normatifs sur l'approche produit ne doit pas masquer l'écart qui peut exister entre ces discours et les pratiques des entreprises ». [Tukker'00], dans un rapport sur l'état de l'art de l'éco-conception, affirmait en 2000 qu'il s'agissait d'un phénomène juste émergeant et toujours en phase de diffusion. Enfin, pour [Johansson'01], qui établit le bilan de plusieurs études, « [celles-ci] montrent clairement que le degré de pénétration de l'éco-conception dans l'industrie est plutôt limité » et les entreprises ont une approche parcellaire de la prise en compte des contraintes environnementales. [Lindahl'03]

²⁰ TIC : secteur des technologies de l'information et de la communication

²¹ http://www.st.com/internet/com/CORPORATE_RESOURCES/FINANCIAL/FINANCIAL_REPORT/ST_2010_sustainability_report.pdf

²² POEMS : product-oriented environmental management system

note que la dimension de environnementale est appelée à devenir un sujet incontournable, à l'instar de la qualité. Quand est-il aujourd'hui, 10 ans après ces études ?

Bien que certaines remarques et mises en garde de la dernière décennie semblent toujours d'actualité pour de nombreux secteurs, l'ensemble des industriels communiquent aujourd'hui leur intérêt relatif à des pratiques d'éco-conception. Elle est une réalité industrielle en ce sens qu'elle est désormais une contrainte incontournable. Par obligation réglementaire notamment, des secteurs industriels comme le secteur automobile, le secteur électrique et électronique, ou celui des emballages, y sont confrontés depuis plusieurs années et ont été contraints de mettre en œuvre des solutions concrètes qui aujourd'hui sont des pratiques courantes dans l'entreprise.

En France, selon une étude BVA commandée par l'ADEME en 2009²³, parmi les entreprises réalisant elles-mêmes la conception de leurs produits, 39% ont initié une démarche d'éco-conception et près de 35% sont sensibilisées à la problématique. 77% des entreprises déclarent que l'éco-conception est un facteur important pour la réussite de leurs projets de développement de produits. Aujourd'hui cette démarche ne concerne donc plus seulement un nombre restreint de précurseurs mais est appliquée, ou au moins largement considérée, par la plupart des entreprises. De plus, [Behrisch'10], dans un état de l'art des pratiques dans les agences de conception industrielle en Allemagne et en Australie, remarque que la majorité reconnaissent ne pas utiliser activement des pratiques éco-conception, mais celles qui sont mobilisées ont recours à une gamme élargie de pratiques.

Les entreprises aujourd'hui communiquent à leurs parties prenantes sur leur politique environnementale et les investissements relatifs : cette diffusion est une part du processus de légitimation des activités de l'entreprise [Gray'95]. Néanmoins, un certain nombre de limites doit être souligné. D'une part, l'absence de règles communément admises par les praticiens rend les méthodes utilisées par les entreprises non comparables [Janicot'07]. De ce fait, l'engagement peut rester superficiel, et faire l'objet d'un apprentissage en boucle « simple » sans être réellement approprié par les acteurs de l'entreprise [Baret'09]. D'autre part, la liberté du management environnemental rend peu satisfaisante la mesure des performances [Antheaume'01].

En guise de résultat à la question de l'intégration de l'éco-conception dans une entreprise, nous retiendrons que les industries et leurs parties prenantes sollicitent fortement le déploiement de ces pratiques mais que les réponses données par les entreprises ne correspondant pas forcément à l'engagement qui est attendu.

3 Les raisons de l'engagement d'une entreprise

Avec l'avènement des politiques-intégrées-produit sur les biens de grande consommation, le besoin de certifier des produits intermédiaires, c'est-à-dire qui ne sont pas directement destinés au consommateur final, devient plus important. Ce phénomène est dû à une pression législative accrue mais aussi des demandes de certains clients. Dans cette partie, nous allons voir quelles sont les spécificités du secteur qui expliquent l'engagement croissant des entreprises microélectroniques dans un programme de management de l'éco-conception et ce qui les y poussent aujourd'hui. Nous avons relevé les différents avantages prônés par les entreprises, tous secteurs confondus puis, si

²³ <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=69797&ref=23980&p1=B>

besoin, nous amenons de remarques spécifiques au secteur microélectronique. Les sources utilisées sont principalement les sites internet, les rapports annuels et les journaux généralistes sur l'actualité des entreprises (Expansion, Usine Nouvelle).

3.1 Evolution des réglementations : mise en conformité et anticipation

Les exigences relatives aux questions environnementales se sont renforcées depuis 2000 à travers le monde. Des textes législatifs relatifs aux produits verts sont apparus. La Figure 9 montre que les textes concernant les aspects environnementaux des produits se sont multipliés. La plupart des gouvernements ont introduit des règlements et co-régulations incitant les entreprises à prendre des mesures pour devenir plus durables et à mettre en œuvre les principes de responsabilité étendue du producteur : le Tableau 5 donne un aperçu des réglementations en vigueur dans certains pays. Ces textes de lois sont prompts à inciter les entreprises à s'engager sur l'aspect environnemental de leurs activités.

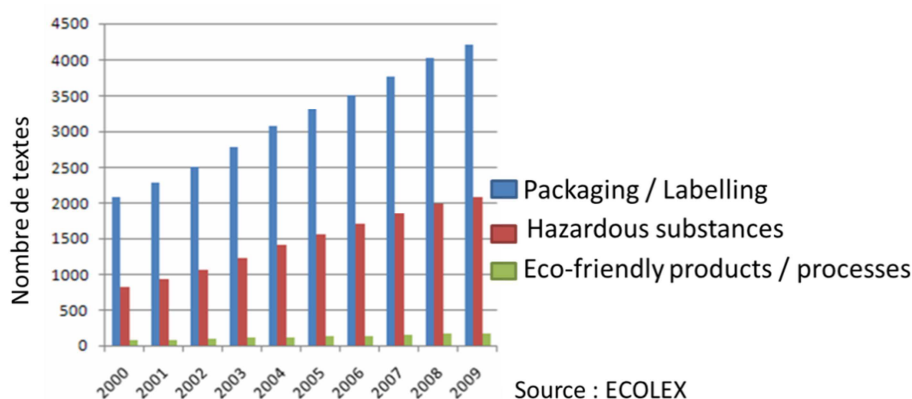


Figure 9 : Evolution des législations environnementales dans le monde de 2000 à 2009

Tableau 5 : Exemples de législations relatives au Life Cycle Thinking

Région	Loi/ Directive/ Réglementation	Produits concernés
Japon	Law for the Life Cycle Economy Law for the Promotion of Utilization of Recyclable Resources Law for the Recycling of Specified Kinds of Home Appliances	Appareils ménagers Equipements électriques et électroniques
Chine	Circular Economy Promotion Law Cleaner Production Promotion Law	Equipements électriques et électroniques
Australie	National Packaging Covenant and proposals for similar co-regulatory schemes for TVs and Computers	Télévisions, Ordinateurs
Etats-Unis	California RoHS Law	Equipements électriques et électroniques
Japon	Ministry of Economy, Trade and Industry. Law for promotion of effective utilization of resources, octobre 2001 http://www.meti.go.jp/english/information/data/cReEffecte.html	Lampes fluorescentes,
Europe	Directive relative à la limitation de substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS) Directive relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) Directive relative aux véhicules hors d'usage (VHU) Registration Evaluation Authorization of Chemicals (2006) (REACH) Directive pour l'éco-conception des produits liés à l'énergie (ErP)	Véhicules Produit utilisant de l'énergie Equipements électriques et électroniques Piles et accumulateurs

Tous ces textes tendent au même objectif qui est la mise en place d'une économie circulaire. L'intégration de l'environnement aux valeurs de l'entreprise est donc un moyen de répondre aux législations et de les anticiper. Un système de gestion orienté-produit permet aux entreprises de limiter les risques liés à la chaîne d'approvisionnement, par exemple l'achat puis l'incorporation de substances bannies du fait d'une mauvaise traçabilité.

Le secteur microélectronique est concerné principalement par trois textes européens intégrant le « life cycle thinking » [Szendyuch'07]:

- Directive RoHS : pour un fabricant de produits microélectroniques, elle se matérialise par des obligations de retirer certaines substances et de respecter des seuils sur la contenance en d'autres substances.
- Règlement REACH : ce règlement vise à supprimer progressivement dans l'Union Européenne les substances les plus dangereuses. La charge de la preuve de l'innocuité des agents chimiques utilisés est inversée puisque c'est à l'industriel de le faire avant la mise sur le marché, par des études sur les risques sur la santé humaine et sur l'environnement.
- Directive EuP élargie pour devenir ErP: à la suite d'une décision datant de Juillet 2005, l'Union Européenne a lancé une consultation avec des réglementations autour des problématiques d'éco-conception couvrant presque tous les produits consommateurs d'énergie disponibles sur le marché, groupés en 20 catégories : ordinateurs de bureau, portables, écrans d'ordinateurs, etc. La plupart des clients d'une entreprise microélectronique sont potentiellement concernés par ErP.

Outres les aspects environnementaux, la responsabilité des fabricants de composants microélectroniques vis-à-vis de principes du développement durable est étendue à des aspects éthiques. Depuis 2010, une section de la loi américaine Dodd Frank²⁴ oblige les entreprises américaines à être transparentes quant à l'origine de leurs métaux. L'industrie électronique doit faire face à un problème grandissant dû à l'usage des 'conflicts metals'. L'exploitation de certains métaux est associée à de graves violations des droits de l'homme dans les zones de conflit de République Démocratique du Congo et de ses pays limitrophes. Pour répondre à cette obligation, l'industrie microélectronique a dû mettre en œuvre rapidement des systèmes de traçabilité robustes sur la provenance de ses métaux afin de limiter les risques d'approvisionnement non-éthique.

Par l'application de ces directives, les responsabilités des fabricants et distributeurs sont étendues à l'ensemble du cycle de vie du produit. La tendance mondiale du durcissement des réglementations et de l'introduction de réglementation incluant du « Life Cycle Thinking » joue un rôle critique dans le développement de système de gestion de l'environnement dans tous les secteurs d'activités. La mise en conformité est l'un des moteurs puisque l'éco-conception est utilisée comme outil pour répondre à une exigence et non à une option.

Outre l'arrivée de défis en conception pour qu'un produit soit mis en conformité, la difficulté est également de jongler avec le contexte législatif mondial assez hétérogène. La communication des entreprises microélectroniques invoque aujourd'hui la réglementation comme un stimulus

²⁴ Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act, Public Law No: 111-203, 21 Juillet 2010.

contrairement à certains arguments présentant les mesures de protection de l'environnement comme un fardeau financier qui affaiblirait leur compétitivité sur les marchés internationaux.

3.2 Réaliser des bénéfices économiques et financiers

L'éco-conception n'est pas seulement un argument en faveur de marketing: elle peut conduire à de réelles réductions de coûts, car elle est considérée par les entreprises comme un processus d'optimisation continu. L'éco-conception est un nouvel outil pour l'entreprise utile pour maîtriser ses coûts et réaliser des gains financiers. En effet, elle devient un moyen d'optimiser la production en consommant moins de matières (flux de matières et d'énergie), en utilisant des procédés plus performants ou encore en maîtrisant des coûts additionnels liés au traitement des déchets et émissions. De plus, un système efficace de veille réglementaire permet de réduire des coûts supplémentaires liés à une mise en conformité pressante ou à des amendes de non-conformité. Dans une étude franco-québécoise sur l'exemple de 30 entreprises, [Plouffe'11] montre que l'éco-conception est un facteur de rentabilité et de compétitivité. 80% des entreprises engagées dans ces démarches ont des marges égales ou supérieures à celles d'un produit conçu de façon traditionnelle.

[Albertini'11] considère que les leviers, qui motivent l'engagement d'une entreprise, peuvent être réuni dans un seul, l'aspect économique. Les motivations des entreprises à s'engager dans une démarche environnementale seraient essentiellement économiques dans la mesure où elles cherchent, soit à éviter les pénalités et les sanctions financières en se conformant aux règlements, soit à « maintenir leur légitimité auprès de leur parties prenantes pourvoyeuses de ressources », comme les clients et les actionnaires, ou encore à tirer profit des contraintes imposées par les parties prenantes en cherchant à obtenir un avantage concurrentiel et l'acquisition d'un savoir-faire.

3.3 Développer un avantage compétitif

Tandis que le critère environnemental fait de plus en plus partie de l'acte d'achat, la mise sur le marché d'un produit éco-conçu est un argument concurrentiel. L'intégration de contraintes environnementales en conception amène une différenciation positive et permet une communication avantageuse sur le produit. En effet, une conception intégrant les exigences environnementales est novatrice et fait gagner des parts de marché, à condition d'être pionniers du secteur. [Judge'98] écrit que l'avantage compétitif repose sur la capacité de l'entreprise à combiner l'ensemble des ressources, humaines, financières et matérielles, en utilisant les savoirs et « savoir-faire » dans le cadre d'une stratégie engagée.

La mise en œuvre d'un système de gestion de l'éco-conception dans une entreprise doit être effectuée de manière pérenne pour prouver la légitimité de ses engagements : l'entreprise informe ses clients qui lancent les produits électroniques en certifiant les produits intermédiaires. Les actionnaires et autres parties prenantes sont demandeurs d'informations sur l'environnement et de données précises et factuelles. Une entreprise regarde la politique environnementale de ses fournisseurs et recherchent des résultats significatifs.

Ainsi, le produit éco-conçu peut donner lieu à l'ouverture de nouveaux marchés ou au moins répondre aux attentes naissantes du marché. De plus, la communication sur les performances environnementales du produit et la mise en avant de pratiques d'éco-conception prouvent que

l'entreprise est engagée dans une politique pérenne en faveur du développement durable. Cette valorisation possible des produits éco-conçus incitent les industriels à s'engager dans une démarche d'éco-conception. Une entreprise développe un avantage compétitif par le biais de l'innovation, en ajoutant de la valeur au produit.

Il existe deux types de demandes des clients relatives à des produits éco-conçus :

- les demandes exprimées par les clients finaux pour des produits «verts». L'entreprise a comme stratégie d'emporter de nouvelles parts de marché ;
- les demandes exprimées par des donneurs d'ordre. Il s'agit alors de respecter un cahier des charges client. Le cahier des charges oblige les concepteurs à imaginer des solutions plus respectueuses de l'environnement (baisse de la consommation électrique par exemple).

Aujourd'hui, dans le cas d'un produit microélectronique, les demandes des clients finaux ne concernent pas directement l'amélioration des performances environnementales. Cependant, les questions relatives à l'impact généré par les produits sont en augmentation croissante, montrant l'intérêt nouveau des entreprises vis-à-vis de ces problématiques. Les entreprises vérifient également la maturité des processus d'éco-conception mis en place par ses fournisseurs. Cette vérification est notamment réalisée par le biais des agences de notation extra-financière.

On remarque que pour les entreprises dont le cœur de métier est l'électronique et non pas le semi-conducteur (Samsung, Hitachi...), les politiques environnementales sont initiées sur les autres produits puis l'activité semi-conducteur bénéficie de l'image de marque et des actions précédentes sur les produits grand public.

4 Analyse des freins à l'intégration d'une culture d'éco-conception dans une entreprise de microélectronique

Une revue de la littérature montre que très peu d'ACV sur des études de cas industriels ont été publiées [Schischke'01] [Taiariol'01] [Dickinson'02]. L'état de l'art est très limité comparativement à d'autres industries. Il y a plusieurs raisons pour expliquer ce retard. Dans cette partie, nous nous proposons de lister les spécificités de ce secteur qui font que la mise en place d'une politique intégrée des produits semble longue à s'installer.

4.1 Culture d'innovation dans un marché ultra-concurrentiel

La conception de technologies semi-conductrices est liée à des innovations et améliorations constantes, dues au contexte très concurrentiel : les technologies sont renouvelées tous les deux ans. L'intégration de processus d'éco-conception devrait s'adapter au calendrier très serré de la conception. En outre, la quantité et la diversité des composants rend difficile la définition de données génériques pour la microélectronique dans les bases de données, comme EcoInvent.

Dans un rapport de 2011, le Sustainability Consortium [Kahhat'11] constate que considérant un ordinateur portable, la contribution environnementale des cartes-mère est considérable. Les auteurs avaient pour but de dresser des modèles prédictifs de calcul de l'empreinte carbone d'une carte-mère à partir de sa surface et du nombre de connexions mais ont constaté que la corrélation était impossible à partir de ces paramètres ce qui est dû, notamment, au renouvellement rapide des technologies. Ce résultat est important car il montre les limites des modèles prédictifs.

4.2 Pas de solution alternative viable

Par ailleurs, l'éco-conception en microélectronique peut faire face à une limitation commune à tous les secteurs d'activité : l'impossibilité de gérer de nouvelles transversalités internes qui permettraient de changer de trajectoire technologique. Le critère environnemental ne peut évidemment pas remettre en question des trajectoires et ses choix de conception associés.

[Abrassart'07] décrit ce phénomène pour l'industrie automobile : « La productivité de l'industrie automobile s'organise depuis un siècle autour de l'approfondissement d'une trajectoire technologique constituée de trois éléments : le moteur thermique, la carrosserie en acier, un système de transmission mécanique. [...] Pourtant de nombreux projets de recherche portent ou sont tirés par des questions environnementales : pile à combustible, moteur hybride, nouveaux matériaux plus légers, etc. Il existe cependant un fossé important entre ces projets de recherche et les projets de développement qui ne remettent pas en cause une trajectoire technologique qui a fait ses preuves en termes de maîtrise du triptyque coût-qualité-délais».

On observe les mêmes phénomènes dans l'industrie microélectronique où au-delà du triptyque coût-qualité-délais, la pression des entreprises informatiques ou électroniques se fait très forte et en fait un marché ultra-concurrentiel. Tandis que certains projets de recherche sur la microélectronique plastique [Pandey'10] [Rizzoa'10] [Vicca'10] où les puces sont fabriquées sur des substrats organiques au lieu de silicium, amènent des possibilités de procédés moins polluants avec des exigences de pureté sur les produits chimiques moins élevées, les industriels, comme ses clients, ne sont pas aujourd'hui prêts à s'y plonger.

Il y a ainsi eu peu de réflexions sur la valeur environnementale des composants, en dehors de quelques initiatives de marketing sur des critères essentiellement techniques issues de l'ingénierie, et les dimensions fonctionnelles ont été peu explorées. Toute démarche alternative, comme celle des entreprises qui incluent la re-conception de la relation entre l'utilisateur et l'objet, ou qui développent des alternatives au produit par des services, n'est jamais envisagée en microélectronique. Or cette démarche pourrait conduire à concevoir de nouveaux produits plus durables à travers des partenariats d'exploration externes inédits pour un fabricant. Autrement dit, les critères environnementaux ont été dictés par la réglementation, mais sans une interrogation plus poussée sur la valeur ajoutée possible pour l'utilisateur final.

4.3 Manque de standardisation pour le secteur microélectronique

Les entreprises motivent leurs actions d'éco-conception par le contexte réglementaire et pour répondre à la pression des ONG, agences de notation, actionnaires, et autres parties prenantes. Les processus d'innovation sont ainsi encadrés et sont souvent unidirectionnels ou bidirectionnels. Par exemple, la mise en application des directives WEEE et VHU poussent les entreprises des secteurs automobile, électrique et électronique vers du 'Design for Dismantling', 'Design for Recycling' et 'Design for Reuse'. Ainsi [Diemer'12] écrit « pour que l'innovation soit une solution viable pour les générations présentes et futures, il convient cependant de dissocier le mythe de la véritable révolution environnementale ». En effet, la dématérialisation, associée à l'essor des services et des technologies de l'information et de la communication, contrairement aux idées reçues, peut être à l'origine d'effets néfastes : les améliorations techniques faisant par exemple augmenter la consommation d'énergie du système.

Dans le cas de la microélectronique, les pressions extérieures ne poussent pas dans des directions définies et n'apportent pas de réponses claires sur la responsabilité environnementale des entreprises. Les entreprises du secteur s'appuient donc sur leurs feuilles de route naturelles (miniaturisation et solutions basse consommation) sans remise en question sur la réelle valeur environnementale de ces tendances naturelles. La prise de décision quant aux actions premières à prendre pour éco-concevoir un composant microélectronique n'est encore pas encadrée.

Par ailleurs, et point très important, comme la plupart des bases de données existantes pour l'ACV ont été initiées ou mises à l'essai par et pour certains secteurs d'activité, le support des bases de données traditionnelles n'est pas suffisant : la fiabilité des données d'ICV pour les matériaux dédiés (résines, produits chimiques ultra-purs, plaquettes pré-dopées ou substrats) est faible pour la microélectronique voire inexistante [Plepys'04], plus que pour toute autre industrie. Cet aspect est très important car aujourd'hui les industries microélectroniques n'ont pas la possibilité de recourir facilement à l'ACV du fait de la faiblesse et des vides dans les bases de données.

5 Conclusion du chapitre 3

Alors qu'une liste des enjeux génériques pour l'intégration de l'éco-conception dans une entreprise a été dressée, nous avons également inventorié ceux qui sont spécifiques à l'industrie microélectronique, à son organisation et ses produits et qui vont pousser ou au contraire ralentir une entreprise à s'engager dans une politique intégrée des produits.

La volonté des entreprises du secteur à s'engager dans des démarches d'éco-conception est grandissante du fait d'un contexte réglementaire de plus en plus strict qui emmène les entreprises vers un nouveau fonctionnement d'écologie industrielle. Par ailleurs, le composant « plus vert », « plus responsable » et les preuves de la mise en place d'un management de l'éco-conception sont des éléments qui apportent à l'entreprise une image d'entreprise innovante et engagée dans une démarche proactive de développement durable.

Toutefois, le secteur manque encore de bases pour espérer un déploiement rapide de mécanismes industriels à l'échelle de l'entreprise. Les entreprises doivent se réunir pour définir des standards et des feuilles de route technologiques intégrant des aspects environnementaux.

En conclusion, l'intégration de l'éco-conception en est à un stade équivoque. Il semble qu'aujourd'hui encore les entreprises en soient au stade de l'émergence, du moins en termes de diffusion auprès des employés. Les concepteurs sont les premiers intervenants dans une politique intégrée des produits puisque ce sont eux qui donnent la forme finale au produit et qui donc sont les plus aptes à diminuer les impacts qui seront générés sur le cycle de vie.

Chapitre 4 : De la conception du produit microélectronique à son éco-conception

1 Description du processus de conception d'un produit microélectronique

Une méthodologie d'éco-conception industrielle s'intègre dans le processus de conception de l'entreprise. La compréhension de ce processus est donc une phase primordiale car elle permettra de s'adapter à la fois au concepteur et à l'organisation de l'entreprise pour laquelle la méthodologie d'éco-conception est développée. Dans cette section, le processus de conception d'un composant est décrit.

1.1 Introduction à la modélisation classique d'un processus de conception industrielle

L'activité de conception en ingénierie se définit de plusieurs manières. C'est une activité complexe et interactive qui admet plusieurs représentations. De nombreux auteurs proposent une décomposition séquentielle systématique du processus de conception. Cette décomposition provient du besoin de segmenter le temps et de laisser du temps pour des phases transitoires jouant le rôle de phases de contrôle et de validation. Parmi les nombreuses propositions, nous utiliserons le modèle de Pahl and Beitz [Pahl'96] décrivant schématiquement les tâches dans le processus de conception (Figure 10). Les tâches sont les suivantes : planification et clarification du problème par l'analyse et la structuration du besoin, recherche de principes de solution et de concepts, « emdodiment » et conception détaillée. Ce modèle simplifié présente l'avantage d'être exhaustif et explicite dans le détail des tâches qui interviennent.

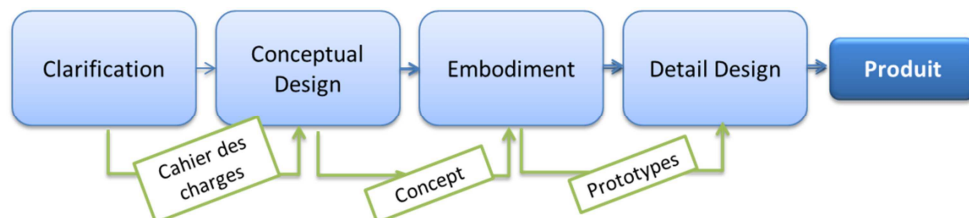


Figure 10 : Modélisation simplifiée du processus de conception [Pahl'96]

Le processus de conception est ponctué de réunions de suivi de projet qui statuent sur l'avancement de la conception. Ces revues de conception permettent de valider les choix réalisés à des moments-clé et de passer aux étapes suivantes. Elles définissent et valident le niveau de maturité d'un produit et fournissent des règles communes pour la conception. Différents certificats sont obtenus si et seulement si l'ensemble des éléments de contrôle est validé. Nous parlerons de conception préliminaire comme le regroupement des deux premières phases, et de conception détaillée pour les deux dernières.

- Conception préliminaire

- *Planification et clarification du problème.*

Cette activité est liée à la définition d'une stratégie de conception et d'un cahier des charges fonctionnel pour le produit. Cette activité consiste à faire l'analyse du besoin du

marché. Elle aboutit à la description de l'ensemble des spécifications techniques du besoin que doit satisfaire le produit vis-à-vis du client final, sous la forme d'un cahier des charges.

- *Conceptual design : Recherche de principe de solutions.*

C'est la phase de recherche de la structure fonctionnelle et des solutions de principe, combinées ensuite en concepts ; puis viennent ensuite la définition du concept, exploration, évaluation et sélection. Un premier concept du produit est mis au point.

- Conception détaillée

- *Embodiment : Design & validation*

Les concepts sont traduits en architectures. Pendant cette phase, sont déterminés les choix architecturaux, les choix de composants et de leurs paramètres pertinents, ainsi que les principales dimensions du système. Les formes et matériaux sont également déterminés, avec la prise en compte de critères économiques. Cette phase est liée à des processus de décision itératifs et souvent récursifs. Les prototypes sont réalisés. Plusieurs générations de prototypes correspondent aux différents stades de l'embodiment.

- *Detail Design : Engineering & Qualification*

Cette phase voit la production de plans et de spécifications détaillées et de mise en place du processus de fabrication et de systèmes de contrôle. A la fin de cette phase, le produit est qualifié et peut être industrialisé. Les commandes sont acceptées uniquement sur les échantillons prototypes pour les valider avec le client.

1.2 Deux concepts pour le succès de la conception d'un produit microélectronique

Le niveau d'intégration toujours croissant du nombre de transistors par circuit, atteignant aujourd'hui plusieurs millions, a obligé les équipes de conception industrielle à développer certains concepts innovants en conception et très spécifique à cette industrie : la stricte séparation entre conception et fabrication et la gestion de la conception par des niveaux d'abstraction. Les outils d'aide à la conception ont ainsi évolué depuis une vingtaine d'années en intégrant ces principes.

1.2.1 Séparation entre conception et fabrication

Les contraintes dues à l'échelle micrométrique, à la recherche de l'efficacité énergétique ou encore au développement de meilleures performances ont conduit à des défis de haut niveau technologique dans la conception de composants microélectroniques. Pour faire face à ces défis tout en assurant la fabricabilité, la chaîne de conception est extrêmement structurée, basée sur une stricte séparation entre la fabrication et la conception. [Masuzawa'00] décrit la chaîne de processus liée au développement et la fabrication de produits et les interactions entre la technologie et le produit. Cette chaîne, comme toute autre en conception de produits manufacturés, ne peut être considérée comme une chaîne continue. En effet, les matériaux, pièces et composants sont des objets physiques alors que la conception, la transformation, l'assemblage, le contrôle et la mesure sont des technologies. Le défi est de transformer la chaîne de processus, puis connecter ces étapes dans un flot ininterrompu (Figure 11).

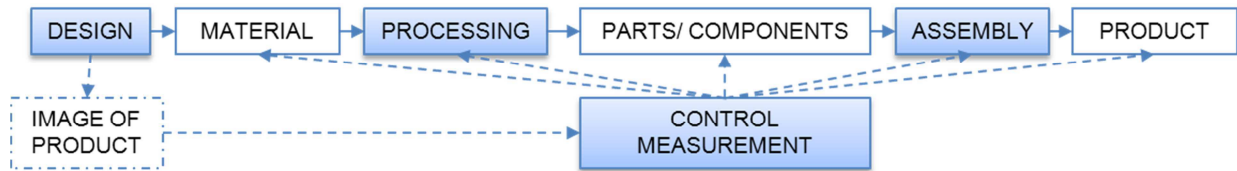


Figure 11 : Relations entre les technologies et les objets [Mazukawa'00]

Toute décision prise pendant la conception a une conséquence sur la fabrication qui doit être évaluée. Le lien entre conception et fabrication n'est pas naturellement bien défini. Les techniques de fabrication sont en constante évolution, les processus deviennent plus complexes avec la diminution de la taille des circuits. C'est pourquoi il est nécessaire de fournir des règles pour les concepteurs qui garantissent la fabricabilité. Le principe utilisé pour assurer la fabricabilité est comparable à une structure limitée dans laquelle les concepteurs peuvent faire évoluer les paramètres du produit sans altérer la fabrication. Ces règles sont décrites en HDL (*hardware description language*), un langage textuel décrivant à la fois le comportement électrique du circuit et sa structure.

1.2.2 Des niveaux d'abstraction

Pour gérer et absorber la complexité, à la fois d'un point de vue fonctionnel et de la fabrication, la conception est structurée au travers de différents niveaux d'abstraction [Rubin'94] [Rabaey'03]. Les niveaux d'abstraction sont les suivants (Figure 12) :

- Système : niveau fonctionnel (architecture)
- Module : Niveau Register Transfer Level (micro-architecture, bloc)
- Porte logique (OR, NAND, NOR) issues de la logique booléenne
- Circuit électrique : ensemble de composants passifs et actifs (transistor, résistance, capacité...).
- Device : réalisation physique des composants (actifs et passifs) dans le silicium avec les caractéristiques physiques intrinsèques.

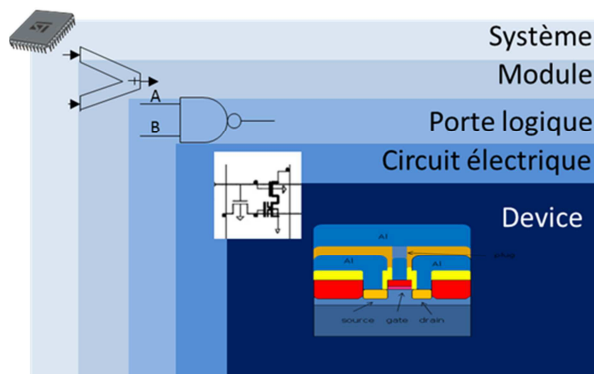


Figure 12 : Niveaux d'abstraction [Rabaey'03]

Créer un modèle à un niveau supérieur d'abstraction consiste à enlever les détails du niveau inférieur et conserver un modèle simplifié. A certains moments de la conception, les détails internes d'un module complexe sont extraits et remplacés par une boîte noire. Ce modèle contient virtuellement et avec précision les informations nécessaires pour utiliser le bloc au niveau suivant de la hiérarchie. Dans la pratique, la performance du modèle défini de cette manière n'est en général influencée que de façon marginale par la façon dont elle est utilisée dans l'ensemble du système.

1.3 Schéma du processus de conception collaborative d'un produit microélectronique

1.3.1 Phases et acteurs de la conception

Le secteur microélectronique comprend trois types d'entreprises :

- Les fabricants : ce sont des entreprises qui conçoivent et fabriquent ses composants.
- Les entreprises 'fabless' (sans usine, sans unité de fabrication) : elles sont spécialisées dans la conception et la vente. La fabrication est sous-traitée à des sociétés spécialisées dans la fabrication de semi-conducteurs, les fonderies.
- Les fonderies : ce sont des entreprises spécialisées dans la fabrication et travaillant pour le compte d'autres entreprises en charge de la conception.

Dans cette partie, nous allons présenter le processus de conception classique d'un produit microélectronique, dans son ensemble, par un fabricant. Certaines parties sont valables pour les fabless et les fonderies mais le raisonnement est conduit pour une entreprise responsable de la conception et de la fabrication des composants. L'ensemble de nos remarques est basé sur l'observation et l'analyse de l'organisation interne de l'entreprise STMicroelectronics.

La Figure 13 représente schématiquement le processus de conception d'un produit microélectronique, composé de cinq phases de développement, depuis la définition d'un concept jusqu'à sa fabrication. Cette description de l'activité de conception est une formulation issue d'une synthèse des activités de conception telles qu'elles sont décrites dans les procédures et documents internes de STMicroelectronics. Les cinq phases sont les suivantes :

1. Définition du concept du produit : phase de construction du cahier des charges fonctionnel et de sa traduction en cahier des charges technique ;
2. Dessin du circuit électrique : phase qui commence par le dessin du circuit et finit avec la génération des fichiers pour la production des masques photolithographiques ;
3. Conception de la technologie semi-conductrice : définition de l'ensemble des éléments nécessaires à la fabrication de la puce ;
4. Conception du boîtier : définition de l'ensemble des éléments d'assemblage du boîtier ;
5. Développement de la solution complète : conception du circuit encapsulé dans un boîtier.

L'activité « Hardware » n'est pas traitée dans cette section. Cette activité a pour but de développer et fournir les cartes pour la validation, l'évaluation, les tests puis la promotion du composant.

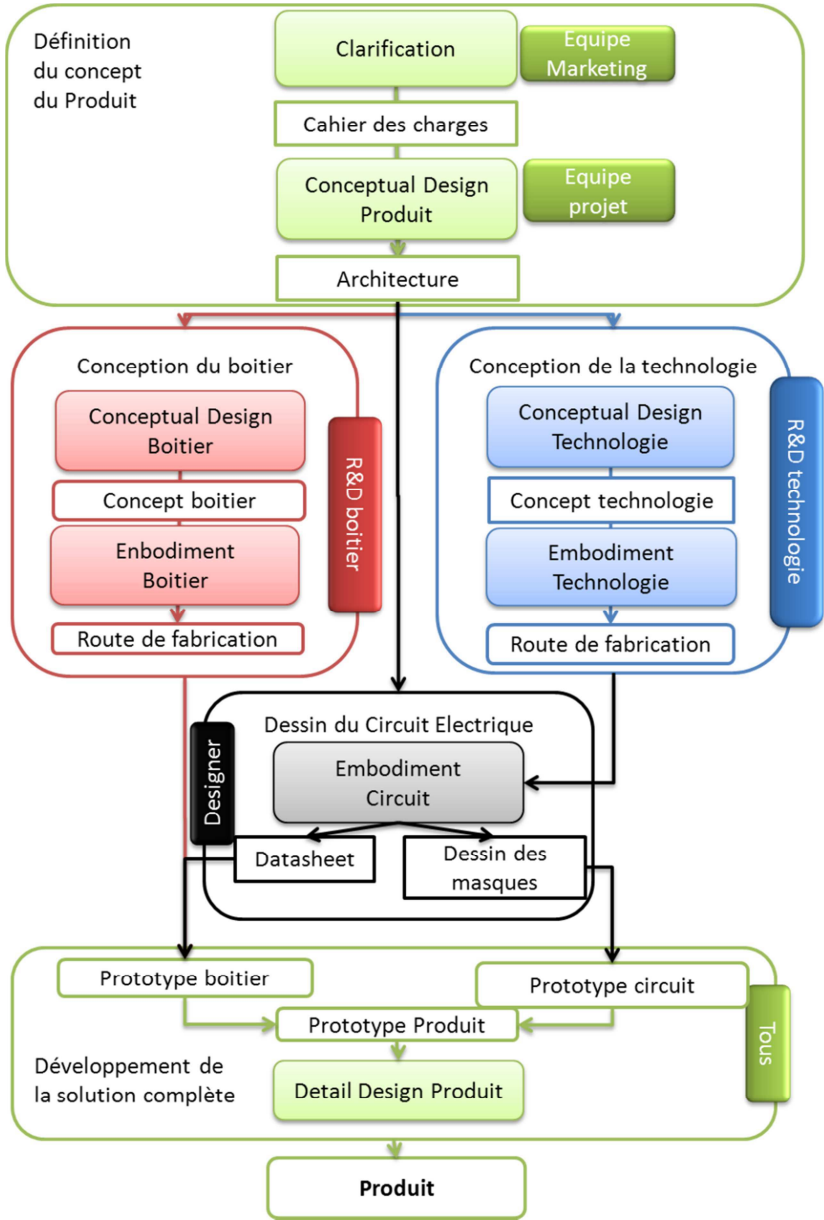


Figure 13 : Modèle simplifié de conception d'un produit microélectronique

Le Tableau 6 résume les responsabilités des différents acteurs, inspiré de [De Grave'07]. On le voit, d'ores et déjà, les équipes de conception de technologies de fabrication sont distinctes de celles de conception de circuit. Le rôle exact des acteurs et la description des tâches qui leur sont allouées seront détaillés dans la suite de cette section. Les acteurs du processus de conception contribuent tour à tour au développement et à l'évolution du choix des matériaux, des structures géométriques ainsi que des propriétés mécaniques et électriques du produit final. Les relations entre ces acteurs sont complexes. Le développement d'un nouveau produit est un mécanisme non linéaire : les échanges ascendants et descendants sont nombreux. Les mécanismes de conception collaborative sont complexes à modéliser, tout particulièrement dans les premières phases de conception, où le lien est fait entre la fabrication et la conception. Les contraintes de fabrication, pourtant éloignées des métiers de la conception du circuit, doivent être incluses la description du produit. Pour Brissaud, «concevoir est mettre en relation des entités (individus, objets et connaissances) qui ne peuvent être déterminées au préalable» [Brissaud'98]. Les activités des métiers de conception en microélectronique sont concourantes et se déroulent en collaboration étroite et concertée.

Tableau 6 : Acteurs de la conception

Phase	Acteurs	Rôle
Définition du concept	Chef de projet	Pilote la conception, veille à la progression des activités d'une manière transparente et coordonnée entre les équipes de développement. Synchronise les plannings. Gère les contraintes de coût/temps/qualité... Il n'agit pas directement sur le produit. Ses connaissances abordent tous les domaines pour un pilotage efficace. Son rôle consiste à diriger la convergence vers une solution optimale des couts /délais /qualité.
	Concepteur de produit	Définit un cahier des charges depuis les demandes d'un client ou d'après des exigences du marché définies à l'aide d'un profil applicatif. Il est responsable du concept général du produit ainsi que de sa géométrie. Il choisit le principe de fonctionnement de l'application. En réalité cette tâche est réalisée par une équipe projet complète composée de différents experts techniques et des équipes marketing.
	Spécialiste Application Physique	Intègre les paramètres physiques dans la traduction du cahier des charges techniques. C'est un spécialiste de la physique de l'application : radiofréquence, biologie, optique, fluides. Son apport est fondamental car il connaît avec exactitude des paramètres spécifiques, amenant certains paramètres très spécifiques, porteurs de nouvelles contraintes pour la conception.
	Ingénieur applicatif	Développe les modules hardware (montage de test) et softwares (interfaces logicielles) pour l'intégration du circuit dans l'application finale. Il travaille en très étroite collaboration avec le client et fait le lien entre le chef de projet et le client. Celui-ci est consulté très tôt dans le processus de conception car il connaît l'application dans laquelle sera embarqué le client.
Dessin du circuit électrique	Designer du circuit électrique	Conçoit le circuit en assemblant des éléments des kits de librairies. Il utilise les outils de CAO intégrés dans des systèmes dit VLSI. Produit le layout pour la fabrication des masques. L'équipe est spécialisée dans le dessin sur certains logiciels et redessine les circuits sous forme de masques selon les standards géométriques.
	Equipe de simulation numérique et test	Aide le designer pendant l'assemblage du circuit. Ce sont des phases clés de l'assemblage du circuit. On note que le temps de test est l'indicateur utilisé pour chiffrer le temps de développement.
	Designer-kit	Conçoit les librairies de composants élémentaires (transistor, capacité...)
Conception technologie et boîtier	Technologue	Conçoit la technologie pour la fabrication du semi-conducteur. Il est le détenteur des connaissances de fabrication.
	Concepteur de boîtier	Imagine la structure du boîtier et la technique d'assemblage
	Ingénieur-procédé R&D	Développe les procédés de fabrication. Les équipes front-end et back-end sont séparées.
	Ingénieur-qualité	Encadre les équipes responsables des tests, fiabilités et caractérisations. La caractérisation apporte des données importantes pour les technologues et les concepteurs de circuit.
Fabrication	Ingénieur-procédé de production	Ajuste les procédés de fabrication pour augmenter les rendements et baisser les coûts.
R&D Avancée	Technologue de R&D avancée	Met au point des techniques avancées de fabrication. Son rôle est très amont à la conception des circuits.

1.3.2 Planification et clarification du problème de conception

La phase de clarification et la rédaction d'un cahier des charges sont des étapes réalisées en commun par les équipes de conception, et donc multidisciplinaire. Cette phase est initiée par la définition d'un besoin sur le marché ou d'une demande client. Elle s'achève sur la décision finale statuant de la faisabilité du projet et du démarrage éventuel de la conception (Figure 14).

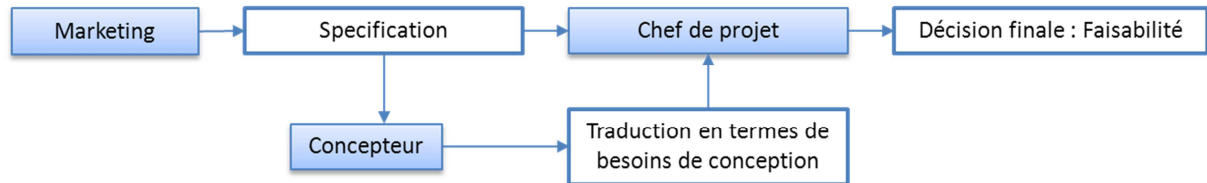


Figure 14 : Acteurs de la phase de clarification

Le cahier des charges fonctionnel est établi conjointement entre le client, le marketing, le concepteur du circuit et le chef de projet. L'équipe marketing traduit les demandes explicites du client, ou implicites du marché, en termes de coûts et de performances techniques minimales. Un tel cahier des charges répond aux demandes d'un ou plusieurs clients ou bien encore d'un marché plus large sans client ciblé. Les cahiers des charges peuvent diverger en fonction de critères électriques, de minima de qualité ou de la quantité de produits commandés. L'idée est de compiler les demandes minimales pour être compétitif dans ce cahier des charges fonctionnel :

- Que doit faire la puce?
- A quelle vitesse doit-elle exécuter les tâches?
- Quelle taille doit-elle faire?
- Quelle énergie consommera-t-elle?

1.3.3 Conceptual Design du produit

Une fois le cahier des charges rédigé, différents acteurs interviennent : le responsable designer, le technologue, le spécialiste en application physique et l'ingénieur applicatif. En fonction du cahier des charges fonctionnel, ces acteurs discutent des possibilités de conception (architecture du système, architecture du circuit, technologies de production) et quelles seront celles à développer. A la fin de cette étape, les caractéristiques macroscopiques de l'architecture du système sont figées ainsi que celles des technologies pour la fabrication.

Les critères de sélection (ou de conception) d'une technologie sont :

- le nœud technologique. Les dimensions du circuit sont divisées par deux d'un nœud à un autre. Les nouveaux produits sont intégrés quasi-systématiquement sur les technologies les plus agressives. En effet, à fonction et architecture équivalentes, la réalisation d'une puce sur une technologie plus récente consomme moins de surface de silicium et donc le coût de revient par puce est plus faible.
- les performances souhaitées : vitesse de calcul, taille de la mémoire, puissances;
- les cellules mémoires embarquées dans le circuit : E2PROM, ROM, RAM, Flash... ;
- la disponibilité en parties analogiques : il existe des technologies qui permettent de rajouter des architectures analogiques telles que des amplificateurs de puissance, de la communication RF, des transistors bipolaires.

- les fonctionnalités supplémentaires. Les MEM's sont des structures électromécaniques tandis que les technologies imager ont des propriétés optiques particulières. Certaines technologies sont adaptées à des systèmes logiques pour micro-processeurs.

On notera qu'une même technologie peut être utilisée pour plusieurs produits, seul le dessin des masques photolithographiques changeant. Ainsi, trois options existent lors du choix de la technologie :

- Une technologie adaptée existe déjà: dans ce cas, les designers du circuit dessinent un ensemble de masques photolithographiques (voir le processus dans la suite), les masques sont commandés puis installés sur la route de la technologie déjà existante ;
- Une telle technologie n'existe pas encore, mais le développement de la technologie pour le nouveau produit peut être fait par analogie : seuls quelques photo-masques sont modifiés afin d'ajouter de nouveaux périphériques ou de modifier les performances des cellules ;
- Une telle technologie n'existe pas encore, elle est développée en même temps que le circuit.

La définition d'un boîtier est souvent rapide car à la fois dépendante du choix de la technologie semi-conductrice et de l'application dans laquelle le composant sera intégré. Le développement de nouvelles familles de boîtier est largement contraint par le standard JEDEC²⁵, qui est un organisme de normalisation catégorisant les boîtiers en familles : les boîtiers mis sur le marché doivent répondre à certains critères afin d'être largement adaptés, compatibles et intégrables à tout type d'applications. Il existe deux possibilités:

- Une famille de boîtier, répondant au cahier des charges fonctionnel existe déjà : dans ce cas, la route d'assemblage du boîtier est facilement adaptable à partir de la description du circuit ;
- Une telle famille de boîtier n'existe pas; un nouveau boîtier sera développé.

On le voit ici, les phases de définition des concepts des trois éléments (boîtier, technologie et circuit) sont séparées, plus ou moins concomitantes, selon un cahier des charges commun. Les contraintes de conception du produit, issues de la phase de conceptual design, sont intégrées dans les définitions propres des concepts de boîtier et de technologie

A l'issue de cette phase, le chef de projet collecte les éléments permettant de décider de la faisabilité du produit, c'est-à-dire si son développement est rentable. L'étude de faisabilité a pour but de chiffrer les ressources humaines, matérielles et financières à allouer à la conception ainsi que de délivrer un calendrier. Le chef de projet est en charge de comprendre ce cahier des charges et de définir si un tel produit est faisable. A ce stade de la conception, certains projets sont stoppés.

1.3.4 Embodiment : dessin du circuit électrique par le processus de conception VLSI

La conception d'un circuit consiste à obtenir une description physique des masques du circuit au niveau physique en partant d'une représentation comportementale de niveau système. Le terme de conception regroupe une méthode descendante de conception et des outils associés pour transformer la spécification d'un système en un produit satisfaisant les performances demandées, le

²⁵ <http://www.jedec.org/>

coût et les contraintes de qualité et de temps de conception [Rousseau'05]. L'équipe de conception du circuit a ainsi des objectifs distincts:

- Respecter les cahiers des charges fonctionnel et structurel. Les critères à respecter sont principalement la taille du circuit, la rapidité et la puissance en fonctionnement ;
- Garantir la fabricabilité ;
- Réduire la connectivité car la vitesse et puissance dépendent de la longueur du trajet des électrons ;
- Réduire le temps de développement ;
- Faciliter la génération de tests (on appelle cette contrainte le Design for Test).

Cette phase est composée de quatre parties principales (Figure 15) : la spécification comportementale, la synthèse comportementale logique, synthèse logique et la conception physique qui génère le layout avant la fabrication des masques. L'annexe 2 décrit ces étapes en détail. Le processus de conception VLSI (Very Large Scale Integrated circuit) est un processus itératif utilisé pour s'assurer d'obtenir un composant dont la fabrication est possible. La fabricabilité est assurée par l'utilisation d'outils VLSI, à l'aide du langage HDL pour décrire la géométrie en 2D. Le modèle proposé ici est simplifié : [Rousseau'05] décrit de façon détaillée les processus mis en jeu.



Figure 15 : Processus simplifié de la conception VLSI

Le principe de « grading in hierarchy » est utilisé dans la conception de circuits VLSI complexes. Un système de grande taille peut être partitionné en plusieurs unités. Chaque unité a des blocs fonctionnels ; les blocs sont construits à partir de cellules ; les cellules sont construites à partir de transistors.

Les principaux paramètres de conception (taille et consommation électrique) évoluent en même temps que l'architecture de la puce. Celle-ci est décrite par un schéma-blocs, représentation graphique d'un système complexe. Les blocs au début de la conception sont des boîtes noires dont la fonction est connue mais pas la structure ni le moyen de réaliser cette action. Les blocs sont connectés les uns aux autres par des lignes d'action. Celles-ci indiquent l'association et la direction des actions. Les blocs deviennent au fur et à mesure de la conception plus détaillés jusqu'à inclure précisément les choix architecturaux.

1.3.5 Detail Design

Avant le lancement en production, un prototype est fabriqué avec les masques de photolithographie dessinés par les designers du circuit puis encapsulé dans le boîtier. Le circuit ainsi fabriqué est testé : les instabilités sont identifiées et supprimées. Une fois qualifié, le produit est lancé en production. Les modifications peuvent intervenir alors indépendamment sur le circuit, le boîtier ou la puce.

1.4 Développement de technologies de fabrication de la puce

L'acteur principal est l'ingénieur appelé « technologue », membre d'une équipe d'« intégration ». Il met au point la route de fabrication pour répondre au cahier des charges

fonctionnel. Ce cahier des charges spécifie les caractéristiques des transistors : puissance, rapidité et taille.

Les prototypes de technologie correspondent à la fabrication du circuit défini par les équipes de design électrique. Bien que ce prototype soit étroitement lié à la conception propre du circuit, les phases d'embodiment pour le circuit et sa technologie de fabrication sont distinctes du fait de la stricte séparation entre conception et fabrication.

Le développement d'une technologie est segmenté en phases.

- ***Conceptual Design***. Le technologue décide des caractéristiques macroscopiques de la puce. Une fois que le technologue a examiné le cahier des charges électrique, un «processus» de fabrication est simulé.
- ***Embodiment***. Il met en œuvre les détails de l'enchaînement des opérations. Les modèles électriques des dispositifs élémentaires sont prédéfinis et la route détaillée est établie. Des premières plaquettes sont fabriquées pour tester des éléments structuraux et ensuite des structures complètes. Les différents éléments sont validés, un par un.
- ***Detail Design***. La technologie a franchi tous les seuils de qualification, elle est maintenant dans sa phase de pré-industrialisation. Les prototypes avancés de circuit pour lesquels des masques de photolithographie ont été fabriqués sont alors testés avec la technologie de fabrication nouvellement élaborée. Quelques améliorations sont encore apportées au processus de production. Au moment de la mise en production, la route est figée.

En outre, le manuel des règles de conception (Design Rules Manual) est rédigé et remis aux designers de circuits à la fin de la conception et le Design Kit est créé par les équipe de design-kit. Le DRM contient les données nécessaires à l'élaboration d'un circuit dans de bonnes conditions, pour respecter la fabricabilité. Il comprend des règles de dessin, concernant la structure des cellules. Le Design Kit, sous forme de bibliothèques, contient les modèles CAO des composants élémentaires et est destiné aux designers.

1.5 Développement du boîtier

L'acteur principal du développement d'un boîtier est l'ingénieur appelé «concepteur de boîtier». Il conçoit la route pour la fabrication du boîtier. Il définit une structure de boîtier permettant l'encapsulation du semi-conducteur et répondant au cahier des charges fonctionnel.

La conception est guidée par différentes contraintes : performances électriques, volume, masse, testabilité, fiabilité, composition (exemption de certains matériaux) et le coût. Le concepteur doit parvenir à des compromis entre ces critères. Les principaux défis, sur des boîtiers de plus en plus petits, sont relatifs au nombre d'entrées/sorties (I/O), à la dissipation thermique, aux performances électriques et la vitesse d'exécution. En outre, les concepteurs sont fortement poussés par les progrès très rapides et continus des semi-conducteurs, et sont donc contraints d'imaginer des protections solides pour des produits toujours plus petits.

Le développement d'un boîtier est soumis, au même titre que les produits et les technologies à une segmentation en phases de conception, dont les phases sont décrites ci-après.

- **Conceptual Design.** Le concepteur décide des caractéristiques macroscopiques du boîtier, en fonction du cahier des charges structurel (taille, épaisseurs). Un processus de fabrication est simulé.
- **Embodiment.** Le concepteur met au point les détails des opérations de fabrication en collaboration avec les ingénieurs-procédé. Le concepteur présente aux ingénieurs-procédé les besoins en termes de structure (dimensions, résistance) et de matériaux (propriétés physiques). L'ingénieur-procédé a alors deux options : utiliser des recettes déjà existantes ou alors développer de nouvelles recettes si aucune ne répond aux besoins formulés dans le cahier des charges. Enfin, les prototypes sont fabriqués dans une ligne pilote.
Nous notons que le développement d'un boîtier est réalisé en grande partie par analogie : des briques élémentaires de la famille précédente sont assemblées pour construire la route d'assemblage et d'autres procédés sont créés pour des besoins spécifiques.
- **Detail Design.** À la fin de cette phase, le boîtier a franchi tous les seuils de qualification pour entrer dans sa phase d'industrialisation. Il y a encore quelques améliorations sur les procédés, notamment en termes de rendement et de fiabilité. Les instabilités sont identifiées et supprimées. A la mise en production, la route est figée.

1.6 Développement de procédés de fabrication

Un autre ingénieur, l'ingénieur-procédé R&D, crée les recettes des procédés de fabrication afin de répondre aux demandes des technologues. Les recettes contiennent les informations nécessaires à la mise en œuvre d'un procédé de fabrication. L'ingénieur-procédé est ainsi en charge des équipements et de leurs réglages : nature des fluides et débits (masse ou volume), paramètres physiques (température, pression, vitesse d'attaque, puissance du générateur RF...), durée de l'étape, etc. Les recettes sont adaptées aux exigences de la miniaturisation : éviter les contaminations, améliorer les profils de ligne après gravure (des lignes plus courtes doivent être droites), aplanir les surfaces...

Les ingénieurs-procédé sont regroupés par atelier : un atelier correspond à une zone géographique de l'usine où les équipements regroupés sont de même nature, de même fonction ou contribuant à la même étape de fabrication. Sur une ligne de montage, on retrouve ainsi une série d'ateliers.

La relation entre l'ingénieur-procédé et le technologue est basée sur une étroite collaboration. Le technologue présente ses besoins en termes de structure (dimensions) et de matériaux (nature, densité, propriétés physiques, résistance). Le technologue a alors deux options : utiliser des recettes industrialisées ou demander à l'ingénieur d'élaborer de nouvelles techniques ou recettes pour répondre aux défis techniques. Dans ce dernier cas, il y a de nombreuses itérations entre eux.

Pendant la phase de production d'un produit, l'ingénieur-procédé est amené à améliorer ponctuellement les recettes pour des raisons techniques, de réduction des coûts ou pour l'amélioration du rendement. Un changement de recette est accepté seulement si les modifications sont acceptables en termes de rendements et de coûts, pour l'intégralité des produits pour lesquels cette recette est utilisée et si les performances finales des produits ne sont pas modifiées.

2 Clés d'intégration de l'éco-conception dans l'entreprise

Si l'environnement tend à être un nouvel aspect du socle des valeurs du développement durable, il doit s'intégrer dans l'entreprise et son organisation. Certains principes régissent la mise en place de pratiques puis le déploiement d'un management de l'éco-conception dans les entreprises. Du fait de sa nouveauté et de certains freins naturels, sa diffusion est progressive et mène à des degrés d'innovation croissants au fur et à mesure de la maturité de la politique d'éco-conception d'une entreprise. Dans cette section, nous introduisons l'ensemble des notions importantes relatives à l'intégration de l'éco-conception dans les processus industriels tout en brossant un portrait de la logique d'intégration de ces pratiques dans l'entreprise.

2.1 Intégration de l'environnement au processus existant de conception

Dans les phases préliminaires de développement, les concepts et idées sont plutôt vagues. Les caractéristiques précises ne sont pas encore connues et plusieurs options sont évaluées. Les principaux facteurs qui influencent les concepteurs sont le manque d'informations, l'ambiguïté et l'esprit créatif. La synthèse, avec l'embodiment et la conception détaillée, est la phase centrale dans le développement de produit. Elle clarifie la formulation du problème, les fonctionnalités sont déterminées, les solutions sont définies pour chaque fonction individuelle puis sont assimilées dans une structure. Enfin, la meilleure structure est déterminée.

L'environnement, pour être intégré dans une entreprise et dans la conception de ses produits, doit s'assimiler dans ces phases existantes de conception. [Bhander'03] établit un paradoxe de l'éco-conception : il y a des progressions antagonistes pendant le développement du produit entre le degré de liberté des concepteurs, la connaissance du futur produit et les solutions environnementales possibles. La Figure 16 montre théoriquement que les possibilités d'action sur un projet diminuent progressivement au fur et à mesure que la réalisation physique du produit se rapproche temporellement. La marge de manœuvre pour l'environnement prend ainsi la même forme. Lorsque les solutions techniques sont définies, l'ampleur des futurs impacts environnementaux est figée. On estime ainsi que 80% des impacts environnementaux liés aux produits sont figés au cours de la phase de conception²⁶.

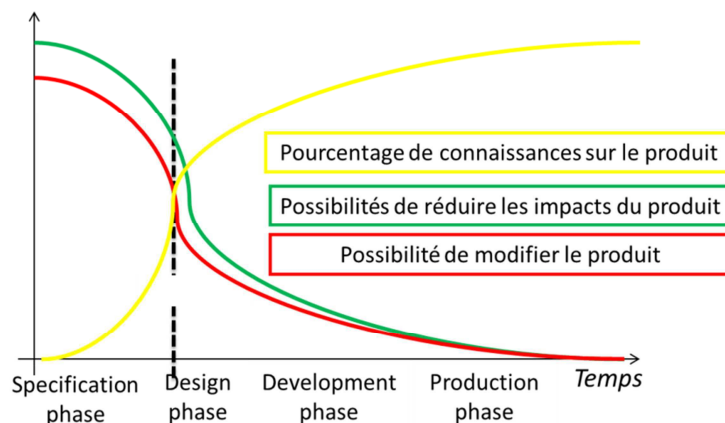


Figure 16 : Possibilité de réduction des impacts en fonction du cycle de vie d'un produit

²⁶ "How to do EcoDesign?", A guide for environmentally and economically sound Design, Edited by the German Federal Environmental Agency, Verlag form, 2000.

Ce phénomène met en lumière que l'intégration de l'éco-conception est par essence contradictoire au développement d'un produit. Il convient que l'optimisation des performances environnementales intervienne dans les stades préliminaires de la conception. Les débats dans ces stades préliminaires mènent à des décisions souvent irrévocables et donc dans ces processus amont, l'analyse environnementale arrive trop tard. Néanmoins, des solutions environnementales ne peuvent être établies à partir d'un seul concept : le profil environnemental est réalisé après sa conception sur un produit fini [Azapagic'99] (Figure 17).

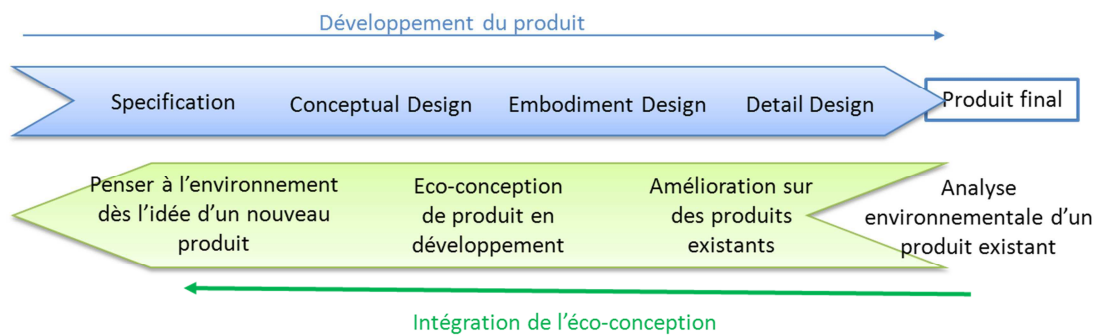


Figure 17 : Niveaux d'intégrations antagoniques de l'environnement dans le développement de produit

Du fait de ses qualités supérieures d'évaluation, l'impact environnemental est souvent mesuré uniquement par des techniques d'ACV [Vinodh'10]. Certes l'ACV est un excellent outil d'évaluation et de comparaison de produits existants, mais elle ne peut guider seule la conception. En effet, sa force est dans l'exhaustivité et donc sa mise en œuvre est difficile voire impossible sur un produit non mature, de nombreuses informations étant connues avec un niveau de précision acceptable seulement une fois le produit fabriqué. Sur un produit industrialisé, les données nécessaires sont connues et leur qualité est très bonne mais, à ce stade, la possibilité d'influencer la conception est infime.

L'intégration de l'environnement en conception est donc nécessairement liée à une diffusion progressive, menant à des degrés d'innovation croissant au fur et à mesure de la maturité de la politique d'éco-conception d'une entreprise (Figure 17). Alors qu'au début de la mise en place de ces pratiques, les concepteurs peuvent souhaiter une amélioration technologique relativement simple mais bénéfique pour l'environnement, plus tard, l'innovation sur le produit issue de l'intégration du facteur environnement à la phase R&D pourra être de plus en plus remarquable. Dans tous les cas, l'intervention précoce des experts ayant un rôle sur l'empreinte environnementale du produit conduit à des phases-clé dans les revues de projet [Olson'92]. Pendant ces discussions, différentes logiques et expertises sont confrontées avant de fixer les caractéristiques du produit et donc figer le futur impact environnemental du produit.

2.2 Développer des supports méthodologiques de conception : méthodes et outils d'évaluation et d'aide à la conception environnementale adaptés au concepteur

De nombreux outils d'éco-conception existent dont le but est de supporter les concepteurs. Des auteurs comme [Bellini'11] ont recensé ces outils. On en dénombre plus de 150. On trouve deux familles principales d'outils utilisées à des stades différents du processus de conception : les outils d'évaluation et les outils d'amélioration. Certains outils sont mixtes et proposent les deux approches (cf. Annexe 2).

Les outils intégrant des techniques d'analyse et d'évaluation sont utilisés pour identifier les impacts environnementaux d'un produit à travers son cycle de vie. Les techniques de synthèse et d'amélioration aident le concepteur à améliorer les performances environnementales des produits, résoudre des problèmes précédemment identifiés. Ces outils peuvent intégrer des outils d'analyse.

[Janin'00] propose une lecture « croisée » des performances des outils selon, d'une part leur qualité globale pour l'amélioration, et d'autre part leur qualité globale pour l'évaluation. Les outils d'évaluation sont jugés selon qu'ils sont qualitatifs ou quantitatifs, selon que l'approche est mono ou multicritère, et enfin selon le type des données d'entrée et de sortie. Les outils d'amélioration sont jugés principalement par leur facilité d'exploitation et leur capacité à mener le concepteur à une solution. La Figure 18 présente une classification des outils.

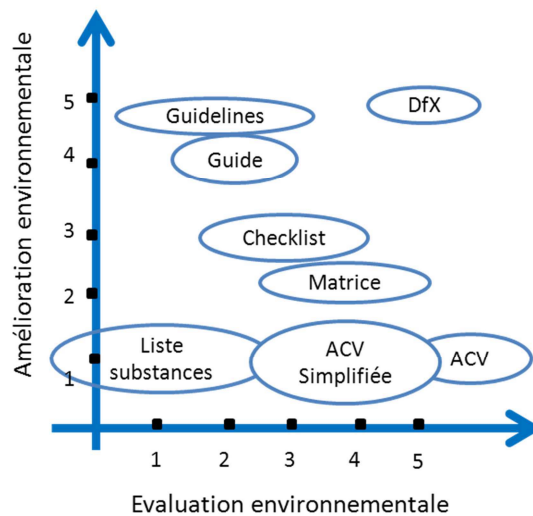


Figure 18 : Classification des outils [Janin'00]

Ce type de classification fait ressortir deux éléments liés à l'utilisation des outils d'éco-conception, et plus particulièrement des outils d'évaluation environnementale :

- les outils ont des niveaux de performance différents. La performance des outils se traduit par la fiabilité, sensibilité, précision des résultats ;
- l'emploi d'un outil ou d'un autre entraîne des difficultés matérielles liées au temps requis pour l'utilisation ou l'apprentissage ou encore à la difficulté d'acquisition des données.

Il convient de choisir un outil en fonction des besoins estimés par et pour l'entreprise, l'outil le plus performant n'étant pas approprié pour toutes les applications.

2.3 Mise en place d'un système de management de l'éco-conception

Avec le démarrage d'un programme d'éco-conception dans une entreprise, traditionnellement des méthodes et outils associés sont développés et intégrés dans les équipes de conception. Ils sont à même de modifier les processus de prise de décision ou au moins d'amener de nouveaux éléments lors de cette prise de décision. Cependant, le simple fait de fournir des outils d'éco-conception n'est pas suffisant pour assurer leur utilisation : l'intégration d'une politique intégrée des produits dans une entreprise est nécessairement liée à des changements organisationnels [Tiger'98].

2.3.1 *Vers une nouvelle organisation de la conception*

Selon [Dewulf'05], l'intégration de l'éco-conception n'est pas seulement liée à l'appropriation par les concepteurs d'outils performants, elle doit être intégrée minutieusement au cœur des opérations de l'entreprise, et ce, sur plusieurs niveaux hiérarchiques : secteur, entreprise, individu.

Au niveau du SECTEUR, des standards au secteur d'activité sont définis : indicateurs, méthodes de calcul d'impacts, données environnementales basiques, limites, etc. Ces standards guident la modélisation du cycle de vie du produit et assurent que les données seront efficacement échangées entre les acteurs et fixent des minima et des objectifs à atteindre.

Au niveau de l'ENTREPRISE, une politique et un ensemble d'objectifs sont introduits dans les procédures internes afin de donner des moyens d'assurer et prouver l'engagement de l'entreprise : orientation des projets R&D, acquisition de ressources (outils, expertise), critères de sélection pour les fournisseurs. [Argyris'00] rappelle que « la volonté de modification d'un acte sans modification de ses valeurs directrices correspond à une action vouée à l'échec ». La stratégie est communiquée et expliquée aux employés. Les mécanismes permettant l'intégration de l'environnement au niveau de l'entreprise dépendent d'une coordination multifonctionnelle. [Fryxeel'99], dans une étude sur 217 entreprises américaines, a identifié les fonctions internes concernées : production, marketing, comptabilité, conception, relations publiques, juridique et achats. Celles-ci doivent être intégrées dans les réflexions et dans la prise de décision.

Le niveau INDIVIDU est lié au quotidien du concepteur. Ce niveau est communément celui où les actions d'éco-conception sont concrétisées sur le produit. La proposition puis la fabrication de nouveaux concepts sont possibles selon les objectifs fixés. L'éco-conception impose les modifications suivantes au processus de conception et dans l'organisation du travail dans l'équipe de conception :

- Utilisation de nouveaux outils (d'évaluation et d'amélioration) ;
- Création d'indicateurs de suivi de projet, pour les aspects environnementaux ;
- Utilisation de nouvelles données ;
- Mise en œuvre de procédures, permettant de valider la prise en compte des contraintes environnementales dans le cahier des charges produit.

Pour [Sarkis'03], l'intégration de l'éco-conception implique la modification de la stratégie de l'entreprise, à deux niveaux : politique générale et politique opérationnelle.

Au niveau de sa politique générale, l'environnement devient une valeur, ce qui modifie naturellement la stratégie de l'entreprise. L'approbation par la hiérarchie, via le changement de stratégie, légitime l'engagement auprès de l'ensemble du personnel. Cette modification de la stratégie contribue à modifier le système de communication de l'entreprise en interne (implication du personnel) et externe (marketing, RSE).

Au niveau de stratégie opérationnelle, les axes stratégiques de développement de produit sont modifiés, ce qui modifie les équilibres dans la définition du cahier des charges du produit. Ainsi, la prise en compte d'une contrainte nouvelle comme celle de la contrainte environnementale va venir modifier la hiérarchie des valeurs habituelles de l'entreprise (performance, qualité, coût, etc.).

Il existe un « gap culturel » pour l'intégration de l'éco-conception dans une industrie car l'entreprise ne possède pas les bases en termes de langage, concepts et compréhension des enjeux environnementaux. De nombreux risques, freins et difficultés d'intégration liés au déploiement d'un programme d'éco-conception efficace dans une entreprise sont répertoriés dans la littérature : nous reprendrons, ici, la liste dressée par [Le Pochat'05] :

- les processus requièrent une somme importante de connaissances et d'informations dont l'accès est souvent difficile ;
- la qualité environnementale d'un produit est une notion floue ;
- l'entreprise a des lacunes culturelles, du fait des langages et des concepts utilisés ;
- le cadre de l'étude inclut de nombreux systèmes (techniques, procédés, données sociales) ;
- des sciences fondamentales sont manipulées (climatologie, écotoxicologie).

2.3.2 Intégration progressive dans l'entreprise d'un programme d'éco-conception

L'éco-conception est un vecteur d'amélioration dès lors que l'implication de la hiérarchie est solide et qu'une stratégie d'intégration a été mise en place. [Brezet'97-a] propose quatre niveaux pour classer les stratégies d'intégration de l'éco-conception (Figure 19) :

- Amélioration du produit : une partie du produit ou une unité de production est modifiée ;
- Re-conception du produit : innovation de la structure ou des techniques de fabrication ;
- Innovation fonctionnelle : les changements sont plus profonds et se matérialisent par l'évolution de la fonction du produit ou une nouvelle conception de la relation à l'environnement de l'entreprise ;
- Innovation des systèmes dans lequel s'intègrent le produit.

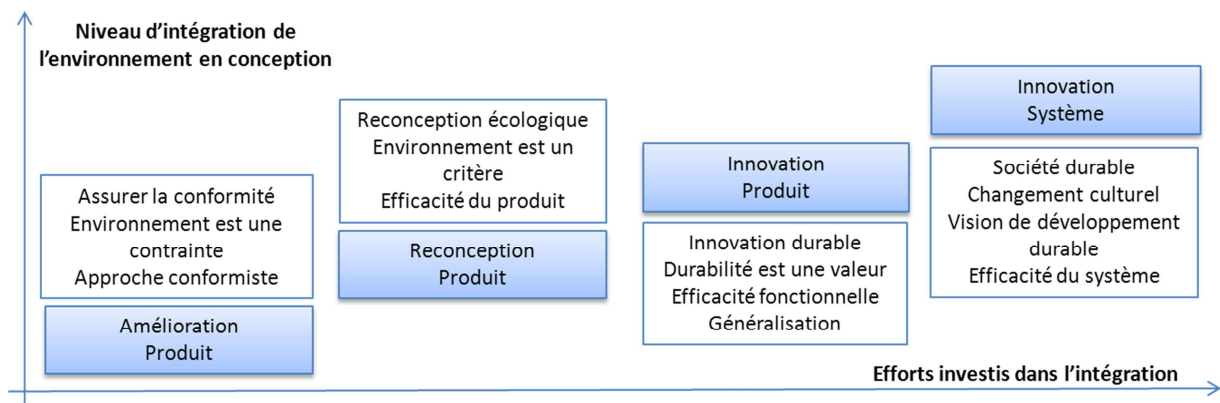


Figure 19 : Niveaux d'intégration de l'éco-conception en fonction du degré d'innovation [Brezet'97-a]

Un système de gestion de l'éco-conception est pensé au niveau hiérarchique de l'entreprise pour viser un haut niveau d'innovation mais des actions ponctuelles d'amélioration doivent être initiées pour sensibiliser les acteurs et pour communiquer les efforts réalisés aux parties prenantes sur des exemples concrets. Dans une entreprise, le passage à des méthodes porteuses d'innovation est en général ardu car requiert une forte réorientation des modes de pensée [McAloone'00].

De ce fait, l'intégration est progressive et se fait selon plusieurs phases, correspondant à des phases d'intégration et d'ancrage du programme dans l'entreprise. En général, les phases sont au

nombre de trois : préliminaire, expérimentale et validation ou standardisation. Toutefois, aucune généralisation ne peut être faite : l'intégration d'action dépend de l'organisation de l'entreprise et du produit [Sarkis'03]. Par exemple, Philips a déployé un programme en trois phases [de Caluwe'04] : experimental, implementation, maturity measurement .

2.3.3 Mobiliser les acteurs de l'intégration et les parties prenantes

Dans le cadre de la mise en place d'une PIP en entreprise, tous les acteurs jouant un rôle sur le cycle de vie du produit ou sur la prise de décision doivent être impliqués. L'organisation du travail est structurée afin de permettre l'optimisation des échanges entre tous les acteurs.

En premier lieu, la cible est le concepteur. Cependant, rapidement, d'autres départements sont impliqués au même niveau que les équipes de conception. Les parties prenantes et leur rôle respectif doivent alors être correctement identifiées.

Les orientations stratégiques dans une entreprise sont disséminées depuis la tête de l'entreprise pour atteindre la sphère individuelle. L'implication des dirigeants de l'entreprise est aussi particulièrement souhaitable [Stevens'99]. Pour atteindre des objectifs environnementaux, la plupart du temps, des compromis seront au centre de la conception. Sans l'accord de la hiérarchie, les équipes de conception n'adopteront aucune mesure amenant un risque supplémentaire [Yongming'09].

En interne, outre le service environnement, les services de R&D, les bureaux d'études, le service marketing, les achats, les ventes ont un rôle à jouer pour améliorer la performance environnementale des produits. En dehors de l'entreprise, les fournisseurs, les sous-traitants, les clients, les consommateurs et les recycleurs sont impliqués.

L'intégration de l'éco-conception est supportée par des équipes expertes, par le rattachement de spécialistes ou la formation spécifique de personnes dédiées. Par la suite, nous appellerons ce spécialiste de l'entreprise, l'expert éco-conception.

En général, son rôle dans l'entreprise est semblable à celui de la qualité. L'expert éco-conception centralise les connaissances en éco-conception. Il est en charge de la communication, la veille technologique et de la formation. Il supervise le déploiement de la stratégie, rapporte ponctuellement sur l'avancement des activités et anime les processus d'amélioration continue. En parallèle, des responsables de la qualité environnementale sont désignés dans les équipes opérationnelles (équipes projets, R&D, etc.). Ils sont en charge du pilotage des actions pour l'équipe, fixent des objectifs (chiffrés ou non) et mènent le projet en vue d'une amélioration continue.

3 Analyse des freins pour l'éco-conception d'un produit microélectronique du fait de l'organisation de la conception dans l'entreprise

3.1 Complexité des mécanismes de conception

Comme expliqué dans la section 1 de ce chapitre, la conception d'un composant est fortement contrainte par le haut-niveau technologique : les mécanismes de conception et les outils d'ingénierie associés sont complexes. De plus, la marge de manœuvre de tous les concepteurs est faible et toute tentative d'amélioration est soumise à de nombreuses vérifications.

Le recours à des pratiques d'éco-conception, et à des supports méthodologiques associés, conduit à de nouvelles considérations relatives à l'efficacité du produit, et est source de modifications de l'organisation dans les phases de conception : l'introduction d'une méthodologie d'éco-conception doit prendre en compte à la fois les complexités des interactions du pilotage du projet ainsi que les difficultés propres aux métiers des acteurs de la conception.

Cet aspect est un frein à l'éco-conception de composants, car outre la faible sensibilisation des concepteurs, l'environnement est perçu immédiatement comme une nouvelle contrainte difficilement intégrable dans le contexte de conception déjà très rigoureux.

3.2 Conception multidisciplinaire : non trivialité de l'optimisation environnementale

L'optimisation en conception intégrant des critères environnementaux n'est pas un problème trivial de conception car elle est liée à l'introduction d'une contrainte, la dimension 'environnement'.

Du fait du fonctionnement d'un semi-conducteur, il existe un lien entre la consommation électrique d'un circuit, ses performances et sa taille : la réduction des dimensions d'un transistor et l'augmentation de la fréquence de fonctionnement engendrent l'augmentation de la consommation électrique. En revanche, au niveau de la fabrication, le recours à un nœud technologique avancé (associé à des dimensions critiques plus faibles) engendre une complexification de la route de fabrication. L'ajout de fonctionnalités permettant de diminuer la consommation électrique peut également être lié à la complexification et donc à une augmentation de l'impact environnemental de la fabrication. Ainsi [Schischke'04] affirme que cette diminution de taille, dictée par la loi de Moore, n'est pas forcément liée à la réduction de l'impact environnemental.

En résumé, les liens entre les deux principaux paramètres de conception -taille du circuit et consommation électrique- sont complexes et donc les lois qui régissent le calcul des impacts environnementaux en fonction de ces deux paramètres n'ont pas été clairement établies jusqu'alors. En microélectronique, mais c'est bien évidemment le cas pour d'autres industries, plusieurs publications, comme celles de [Tang'06] [Ekvall'05], ont montré que l'éco-conception d'un composant amène des formulations différentes de problèmes de conception et ajoute de nouvelles contraintes en conception. Toutefois dans certaines expériences industrielles, l'intégration de critères environnementaux est liée à des bénéfices financiers²⁷ ou sur d'autres paramètres tels que l'efficacité : l'introduction de l'environnement en conception n'amènerait pas de problématiques nouvelles d'optimisation mais uniquement des coefficients de pondération différents.

4 Conclusion du chapitre 4

Le produit microélectronique est un produit hautement technologique et du fait de sa complexité, les méthodes de conception sont extrêmement contraintes. Ces techniques, permettant l'intégration de millions de transistors sur un seul circuit, ont notamment été rendues possibles par le développement d'outils automatiques d'aide à la conception, qui ont évolué constamment depuis les années 80 et qui sont le fruit d'un héritage industriel commun à toutes les entreprises du

²⁷ C. Berneman, P. Lanoie, S. Plouffe, M-F. Vernier, L'éco-conception : Quels retours économiques pour l'entreprise ?, Décembre 2008, <http://www.ecochange.net/rapportetuderetourseconomiques.pdf>

secteur. La fabrication du produit est très exigeante et nécessite d'être conduite par une forte expertise dans les phases de conception des routes de fabrication.

La mise au point de méthodologies d'éco-conception devra être en adéquation avec ces méthodes exigeantes, séparées entre les différentes activités en conception. La description détaillée et la compréhension des rôles des concepteurs dans les phases de conception permettent de définir les marges de manœuvre de chacun de ces acteurs. Lors de changements sur un produit ou le passage d'une génération de produit à une autre, il est possible d'allouer ou au moins d'attribuer les responsabilités environnementales de chaque acteur en fonction de la modification des paramètres du produit. Cependant, les interactions entre les acteurs de la conception et de la fabrication sont difficiles à modéliser et même si on a conceptuellement une stricte séparation entre conception et fabrication, certains paramètres du produit sont largement interdépendants.

Au vu des spécificités du produit, tant au niveau de sa conception que de sa fabrication, l'intégration et le déploiement de méthodologies d'éco-conception chez un fabricant de composants microélectronique se matérialiseront-ils différemment que dans des entreprises manufacturières plus traditionnelles ?

Chapitre 5 : Enoncé de la problématique et de la question de recherche

1 Eco-conception d'un produit microélectronique : limites des méthodes et outils existants pour le contexte de la thèse

1.1 Niveaux d'éco-conception envisageables

Après avoir identifié les tendances naturelles, les stimuli et les freins pour l'éco-conception d'un produit microélectronique, on peut maintenant se positionner sur les objectifs d'une méthodologie d'éco-conception envisageables pour une entreprise du secteur.

Il existe certes une grande complexité des techniques mises en œuvre pour la fabrication et la conception de ces produits mais l'éco-conception par essence a pour but d'améliorer le produit voire de le reconcevoir pour le rendre plus écologique. Les contraintes identifiées doivent être considérées pour le développement d'une méthodologie d'éco-conception et non comme des obstacles. L'aspect environnemental sera lié à la définition de contraintes supplémentaires intégrées au cahier des charges du produit. Si le contexte le permet, le produit est considéré comme un système et cette évolution pourra amener une re-conception du produit en considérant son cycle de vie complet. Pour [Millet'03], il s'agit de démarches d'éco-conception partielles puis classiques.

Dans le cas d'un fabricant de composants microélectronique, l'innovation fonctionnelle du produit, liée à des démarches d'éco-conception innovantes pour [Millet'03], est difficilement envisageable voire impossible; le composant ne peut être considéré comme un système car il n'est qu'une partie minime de l'application finale dans lequel il est intégré. De plus, le client, intégrateur du composant et donneur d'ordre, définit un cahier des charges pour le composant justement relatif à sa structure mais aussi à sa fonctionnalité. Deux des freins identifiés (la variabilité des fonctionnalités et du scénario d'usage et le manque de standardisation) ainsi que le stimulus, sollicitation des clients, montrent en quoi la possibilité pour une entreprise microélectronique de proposer un système de gestion de l'éco-conception est fortement soumise à la réceptivité de ses clients (industriels de l'électronique, automobile etc.). Si, et seulement si, les clients ont la volonté d'agir dans une logique de développement durable, les entreprises pourront collaborer pour trouver des solutions alternatives et innovantes aux composants avec une vision complète du système.

1.2 Analyses de cycle de vie

L'ACV est un pré-requis à la mise en place pour l'éco-conception de produits car elle permet de réaliser le profil environnemental du produit avant sa re-conception puis de mesurer les impacts des modifications en conception. Cet aspect met en lumière la nécessité en éco-conception de maîtriser cette technique.

Dans le domaine de l'expertise environnementale, l'industrie microélectronique semble être en retard par rapport à d'autres secteurs. Une revue de la littérature des ACV ne permet pas de dessiner le profil standard d'un composant, notamment en raison du faible nombre de publications.

Cependant des cas d'études très complets permettent de statuer sur des aspects environnementaux liés aux composants. Pour une mémoire 32Mbit RAM, [Williams'02] a montré avec un inventaire complet que la phase de fabrication est de loin la phase du cycle de vie d'un produit la plus critique en termes d'utilisation de ressources et d'énergie. [Boyd'10] a réalisé des ACV sur plusieurs générations de semi-conducteurs, permettant d'observer l'évolution de leurs performances environnementales. [Schmidt'11] écrit que la donnée actuelle d'EcoInvent («wafer, fabricated, for integrated circuit, at plant») est obsolète car elle «montre de grandes différences» avec les résultats issus de leur étude. Les études aujourd'hui permettent de réactualiser la connaissance sur les réels impacts environnementaux générés par les produits de la microélectronique.

Par ailleurs, pour contourner les difficultés de mise en œuvre d'une ACV sur un composant, plusieurs méthodes d'analyse environnementale ont été proposées. [Schischke'01] propose un outil pour l'évaluation environnementale grâce à des ACV-simplifiées. [Murphy'03-a] a développé des modèles paramétriques pour prédire l'ICV de technologies semi-conductrices en développement. [Krishnan'04] a imaginé une approche d'ACV hybride.

L'ensemble de ces travaux montre que depuis une dizaine d'années, la communauté scientifique a reconnu l'intérêt puis la nécessité de connaître les impacts de la microélectronique et de développer une base de données pour la réalisation d'ACV.

1.3 Autres outils d'éco-conception

En considérant des méthodologies d'éco-conception traditionnelles, on constate qu'elles sont partiellement applicables à un produit microélectronique. Il existe de nombreux outils, simples d'utilisation permettant de réaliser un état des lieux préliminaire et de donner rapidement des pistes d'améliorations pour le produit. On compte notamment : Eco-Pilot²⁸, PILOT [Wimmer'03], Eco-Design Strategy Wheel [Brezet'97-b], les guidelines de DfE [IEC'05] [Finnveden'05], Eco-Impact Matrix [Fargnoli'08]. Les caractéristiques de ces outils sont fournies en Annexe 3.

En microélectronique, du fait des dimensions micrométriques du produit, des techniques de conception et de l'organisation en conception, le champ d'application à un niveau-produit n'est pas approprié et la plupart des axiomes ne sont pas pertinents. Nous verrons plus tard quel est l'impact environnemental relatif des différentes phases du cycle de vie, mais à ce stade il semble évident que la complexité demeure dans la modélisation, la prise en compte, puis la réduction des impacts générés par la fabrication, et son lien avec la consommation d'électricité du circuit.

On l'a vu l'optimisation environnementale est un problème absolument non trivial, qui requiert l'expertise des ingénieurs, à la fois technologues et ingénieurs électroniques. De ce fait, l'utilisation d'outils simplifiés et non spécifiques à ce secteur d'activité, même aux prémisses des réflexions d'éco-conception, ne pourra pas donner de pistes de réflexion aux ingénieurs.

1.4 Revue de la littérature des méthodes proposées pour la microélectronique

Dans la littérature, on trouve plusieurs méthodologies d'éco-conception dédiées à l'industrie microélectronique ou illustrées par une étude de cas de cette industrie. Nous en avons identifié

²⁸ <http://www.ecodesign.at/pilot/ONLINE/FRANCAIS/PDS/INDEX.HTM>

quatre, bien qu'ils en existent d'autres, permettant de résumer les travaux relatifs à l'utilisation de critères environnementaux dans la conception de produits microélectroniques. Pour [Griese'04], [Tang'06] et [Somani'06], ces méthodologies ont pour cadre le développement de nouvelles technologies sur des cas d'études académiques, tandis qu'on retrouve une méthode déployée par Intel, leader du marché des semi-conducteurs, lors de changement de filières technologiques [Harland'07]. Ces différentes méthodologies proposent des approches d'éco-conception pour des produits ou procédés de l'industrie microélectroniques, plus ou moins innovantes.

[Griese'04] propose une méthode sur la base de l'optimisation des procédés de fabrication. La méthode d'éco-conception proposée nécessite une collaboration entre les ingénieurs R&D et les spécialistes en éco-conception, ainsi qu'un partenariat direct avec des industries. L'étude de cas est conduite sur la technique de « solder paste stencil printing » pour le bumping de la plaquette, réalisé selon un processus de cinq étapes élémentaires. Il existe plusieurs autres techniques, celle-ci étant en développement à l'heure de la publication. L'analyse, combinée ente les aspects environnementaux et économiques, comporte trois étapes.

1. Détermination des paramètres-clé qui influencent les performances environnementales et économiques d'une technologie ;

Les coûts financiers de l'entreprise sont prédits pour la mise en production d'une ligne utilisant la technique de 'stencil printing'. Les impacts environnementaux n'ont pas été évalués par le biais d'une ACV car cela aurait été difficilement applicable, selon l'auteur, du fait de la complexité du cycle de vie des produits électroniques et de la méconnaissance des applications ultérieures. Cependant, l'ensemble du cycle de vie est bien considéré grâce à une analyse de flux énergétiques et la toxicité des produits dangereux est mesurée avec l'outil ProTox [Schischke'02]. ProTox renvoie un indicateur unique, le Toxic Potential Indicator (TPI), mesurant la toxicité des flux massiques entrants. Les points faibles sont donc identifiés avec ces deux méthodes sur une ligne pilote.

2. Définition de scenarii de production ;

Pendant la phase de développement, il s'agit d'ores et déjà, de prédire l'intégration de la technique dans un contexte industriel. Les modèles d'intégration sont réalisés en partenariat avec des entreprises selon leur propre plan de production.

3. Comparaison aux technologies existantes et réévaluation des objectifs ;

Un benchmark permet d'identifier les performances des techniques déjà existantes et donc de se comparer afin d'être compétitifs. Sont alors fixés des objectifs, à la fois financiers et environnementaux, qui conduiront le développement pendant la conception détaillée.

La méthodologie proposée par [Griese'04] est assez classique et cohérente pour être intégrée dans un milieu industriel. L'intêret de cette méthodologie est d'avoir défini une alternative à l'ACV pour la mesure des impacts environnementaux.

[Somani'06] décrit une méthodologie d'éco-conception en six étapes pour des technologies semi-conductrices en développement, dont les performances d'une génération à l'autre sont comparées dans l'espace (performance, coût, environnement). Les analyses environnementales sont

réalisées grâce à des ACV, dont la mise en place est simplifiée par le développement de modèles paramétriques sur les unités de procédés et la mise à disposition d'une base de données d'ICV.

1. Identification de la technologie à évaluer ; le cas d'étude est un circuit intégré en trois dimensions.
2. Réalisation d'un état de l'art des alternatives; le circuit-3D est comparé au circuit traditionnel 2D, dont les performances sont connues et évaluées.
3. Définition d'une unité fonctionnelle, «un dispositif logique SRAM DRAM » ; cela permet la comparaison des deux technologies.
4. Conception de la route de fabrication du nouveau circuit-3D prototype pour l'unité fonctionnelle choisie.
5. Comparaison des impacts environnementaux et identification des axes d'amélioration, en termes de performances techniques et environnementales.
6. Amélioration sur les points critiques. Trois options de « handle wafer », identifié comme une étape critique, sont évaluées (couts, performances et impacts environnementaux).

La méthodologie proposée ici rajoute la composante de l'unité fonctionnelle par rapport à celle de [Griese'04]: elle s'attache à définir la fonctionnalité d'un produit et non plus seulement la fabrication d'une plaquette de silicium. L'analyse environnementale est cette fois-ci à base d'ACV : les impacts sont calculés à partir du principe d'ACV-simplifiée en utilisant des modèles paramétriques, comme ceux définis par [Murphy'03-a]. Le calcul est donc réalisé en utilisant des résultats d'ICV stockés dans une base de données. Une fois réalisée l'évaluation des impacts ramenée à l'unité de production adaptée, le processus de réduction des impacts environnementaux qui suit est classique.

La mise en pratique d'une telle analyse environnementale dans une entreprise, et donc sa généralisation à grande ampleur dans une usine ainsi que sa systématisation dans les phases de conception, est liée à la forte contrainte de récoltes de données et mérite une analyse de faisabilité.

[Tang'06] propose une méthodologie d'optimisation multiparamétrique (coût, environnement, fiabilité), illustrée par la re-conception d'une étape de 'flip chip'. Les modèles de fiabilité sont basés sur des modèles constitués à partir de méthodes des éléments finis (FEA) ; l'évaluation environnementale utilise le TPI. Après avoir estimé ces trois aspects indépendamment, la méthodologie propose de les confronter en formalisant le problème de conception. Les contraintes sont formulées en un seul problème à partir de paramètres-clé identifiés comme critiques. Les valeurs optimales de deux paramètres, le choix de la résine underfill et la hauteur des billes, sont alors calculées en utilisant le logiciel VisualDOC²⁹.

Tang *et al.* montrent avec cet exemple qu'un problème d'éco-conception peut être formulé comme n'importe quel autre problème de conception et que la solution optimale est identifiable avec des méthodes de résolution classiques. Le critère environnemental, s'il est correctement évalué, peut être intégré au même titre que le coût ou la fiabilité.

Lors du passage des technologies semi-conductrices en 130 nm sur des plaquettes 8 pouces à du 90 nm sur des plaquettes 12 pouces, Intel a mis en place un système de management environnemental complet en intégrant les principes de 'Design for Environment'. [Harland'07] décrit

29 Vanderplaats Research and Development, 2004, Inc, www.vrand.com/visualDOC.html

les différentes approches choisies et les moyens mis en place pour pérenniser les pratiques. Le changement de nœud technologique a été lié à deux changements majeurs distincts : le renouvellement du parc des équipements et la construction d'une nouvelle usine et de ses infrastructures.

La première étape a été de proposer un schéma directeur pour les aspects environnementaux qui donnent des objectifs communs sur les performances environnementales à atteindre pour la technologie en développement. Ces objectifs concernaient à la fois la mise en conformité avec les réglementations et également des choix stratégiques de l'entreprise (comme la limitation de l'utilisation de PFC en production) liés au contexte mondial et à la considération des propriétés environnementales locales du site.

Le système présenté est complet car tous les acteurs du développement d'une nouvelle technologie sont impliqués : les équipementiers, les 'architectes' des infrastructures des nouvelles usines, les ingénieurs qui sélectionnent les équipements et qui mettent au point les recettes de fabrication. L'ensemble est coordonné par les ingénieurs EHS. Les acteurs principaux sont les ingénieurs-procédé : ceux qui optimisent les procédés d'un point de vue technique et économique, développent l'expertise pour l'optimisation environnementale.

La mesure des impacts est réalisée sur plusieurs aspects environnementaux. Des méthodes analytiques ont été développées pour prédire les impacts environnementaux sur les recettes élémentaires et les équipements et identifier les sources de pollution ou encore comparer les sites entre eux. Elles sont basées sur des systèmes de rapports trimestriels, où les données du site sont normalisées par unité de production (par exemple kilogrammes de COV par plaquette).

Cette mesure a pour but de limiter les impacts environnementaux lors du transfert en analysant notamment les tendances relatives par rapport aux anciennes technologies pour identifier les axes d'amélioration. Outre les mesures d'impacts, des informations qualitatives sont également données aux ingénieurs : une hiérarchie de prévention des pollutions (remplacer les produits dangereux, réduire la consommation de produits dangereux, réutiliser, recycler, abattre). Une communication est faite aux ingénieurs, pendant les phases de conception, sur des objectifs mesurables afin de les inciter à choisir la meilleure option, qui ne nécessite pas d'abattage de pollutions. Les conclusions sont rendues aux ingénieurs en vue de l'amélioration continue et la pérennisation des pratiques.

La méthodologie proposée appliquée dans l'entreprise leader du marché présente une différence notable par rapport aux méthodes universitaires : le rôle et responsabilités des acteurs sont clairement identifiés et la méthode est systématisée à l'échelle de l'entreprise. Harland *et al.* décrivent un système de management environnemental où les acteurs sont les ingénieurs de conception. L'étude de cas est illustré par un changement de filière technologique : la marge de manœuvre des concepteurs est alors la plus importante. On retrouve ici une vision de développement durable d'une entreprise. Toutefois, les méthodes d'analyse environnementale décrites ne permettent pas de définir l'impact environnemental d'un produit sur tout son cycle de vie puisque le cadre est limité à la zone de fabrication.

1.5 Cohérence et limites des méthodologies dans le contexte de la thèse

De cette revue des méthodologies, on retient que les experts émettent des réserves quant à la mise en place de solutions d'éco-conception en microélectronique [Schischke'01][Krishnan'04][De

Grave'06] du fait de la non-maturité des méthodes d'analyse environnementale pour ce secteur et des contraintes élevées de conception et de fabrication rendant la marge de manœuvre des concepteurs très faible. Toutefois, une revue de l'état de l'art permet de trouver des solutions différentes aux nombreux freins à l'intégration de l'éco-conception en microélectronique.

Les problématiques soulevées par cette revue de la littérature, et qui sont celles surlignées au commencement des travaux de recherche, sont les suivantes :

- Comment évaluer les impacts environnementaux générés par un produit ?
 - La mise en œuvre d'ACV est-elle possible ?
 - Quelles sont les alternatives à l'utilisation de l'ACV?

Les feuilles de route de développement des produits microélectroniques en font des produits complexes pour lesquels la modélisation du cycle de vie est un problème non trivial. Les études ayant permis une bonne caractérisation environnementale du produit microélectronique sont très récentes [Boyd'10] et à l'heure des travaux de recherches aucun retour sur expérience n'a été fait ni par les industriels ni par leurs partenaires académiques pour définir un cadre méthodologique sur la modélisation environnementale systématique du cycle de vie d'un produit.

- Quelle stratégie d'éco-conception une entreprise doit-elle adopter dès les phases préliminaires d'intégration de l'éco-conception?
 - Quel niveau est le plus adéquat : amélioration du produit, re-conception, innovation sur le produit ?
 - Quelle forme doit prendre les supports méthodologiques, outils et méthodes, afin d'être adaptés aux spécificités de la conception ?

Tandis que les méthodologies généralistes ne sont pas adaptées aux spécificités de ce secteur d'activité, les méthodologies parues dans la littérature répondent ponctuellement aux problématiques mais leur champ d'étude est souvent limité à la phase de fabrication de la puce (front-end) sans prise en compte de l'impact sur tout le cycle de vie du produit. Plusieurs approches ont été proposées : leur pertinence et leur faisabilité (possibilité d'intégration et de généralisation) doivent être étudiées. De plus, la définition d'un composant éco-conçu est une notion assez floue qui mérite d'être précisée afin de définir le champ d'application des méthodologies.

- Comment intégrer un système de management environnemental orienté-produit chez un fabricant de produits microélectroniques ?
 - Quelles sont les contraintes d'un marché concurrentiel comme celui-ci ?
 - Comment réorganiser l'entreprise pour y intégrer de nouvelles pratiques ?

Le manque de standardisation dans le secteur rend la définition d'une politique d'éco-conception confuse. Du fait d'un positionnement de fournisseurs intermédiaires, les freins à l'intégration de l'éco-conception sont nombreux : le contexte spécifique et les attentes des parties prenantes doivent être pris en compte. Le déploiement d'un système de management de l'éco-conception global dans une entreprise requiert une expertise interne et une analyse des pratiques. L'intégration peut alors a priori être similaire à d'autres secteurs d'activité.

Cette revue de l'état de l'art des méthodologies d'éco-conception existantes souligne la pénurie de méthodologies appropriées aux spécificités de cette industrie. Ceci nous montre en quoi le

développement d'une méthodologie propre à ce secteur semble primordial, depuis une demande formulée par les industriels.

2 Synthèse de la problématique

Des entreprises du secteur microélectronique ont choisi de s'impliquer dans des pratiques d'éco-conception car elles se doivent, d'une part de connaître précisément les impacts environnementaux de chacun de ses produits afin d'en améliorer les performances, et d'autre part, de renseigner ses clients qui mettent sur le marché les produits finis en certifiant ses produits intermédiaires.

Les recherches académiques et les efforts des industriels permettent sa démarginalisation grâce à la conceptualisation puis l'implémentation de méthodes industrielles. Cependant, c'est une science encore jeune et non mature dont les outils associés ne sont pas toujours adaptés à des réalités industrielles et l'écart entre les valeurs prônées par les campagnes de communication et les pratiques réelles des ingénieurs est souvent encore important.

Outre la maîtrise de sa propre empreinte environnementale, une démarche d'éco-conception est un moyen pour les fabricants de semi-conducteurs de proposer de « meilleurs » produits. En effet, les entreprises microélectroniques sont dans une démarche où elles veulent affirmer à leurs clients que toutes les étapes de la conception, de la fabrication et de la distribution aient fait l'objet de décisions prenant en compte les impacts environnementaux sur le cycle de vie. Il est donc nécessaire d'identifier des solutions durables d'un point de vue environnemental sur toutes les étapes du cycle de vie des produits. Toutefois, dans un marché compétitif comme celui de la microélectronique, la prise en compte de l'environnement dans le processus décisionnel semble s'opposer aux pratiques courantes des entreprises du secteur : les freins sont nombreux (Tableau 7).

Tableau 7 : Freins pour l'analyse environnementale et l'éco-conception d'un produit microélectronique

Niveau	Freins
Produit	Taille et structure Complexité de la fabrication Matérialisation secondaire Produit intermédiaire
Secteur	Culture d'innovation Manque de standardisation Pas de solution alternative viable
Individu / Organisation de la conception	Complexité des mécanismes de conception Conception multidisciplinaire

La mise en place d'un système de management de l'éco-conception requiert donc d'aller au-delà de ces freins en apportant des réponses spécifiques au secteur. Les méthodes d'éco-conception traditionnelles, pour la plupart, ne peuvent répondre sans adaptation à la situation spécifique d'une entreprise du secteur microélectronique. Un état de l'art des précédentes expériences dans ce secteur, d'initiatives industrielles ou universitaires, montre que l'ensemble des freins a été identifié mais seulement des réponses partielles y ont été apportées pour supporter l'intégration de pratiques d'éco-conception dans une entreprise.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de recherche est d'investiguer les politiques de produits éco-conçus afin de définir une politique d'éco-conception en microélectronique s'appuyant sur une méthodologie et ses outils associés qui permettront son implémentation réelle. Les spécificités du secteur doivent être prises en compte afin de développer une méthodologie adaptée.

Il est donc attendu de ce travail de recherche :

1. La caractérisation des impacts environnementaux générés par un produit microélectronique. Il s'agit de mesurer et qualifier ses performances environnementales ;
2. Une méthodologie d'éco-conception de produits de la microélectronique qui aide les concepteurs à chaque étape de leur travail et assure des produits à hautes performances environnementales. Les supports méthodologiques (méthodes, indicateurs et outils) mis à disposition du concepteur doivent être identifiés et développés ;
3. Une méthodologie stratégique afin de développer la politique générale sur les produits d'une entreprise du secteur microélectronique. L'enjeu est de définir un plan stratégique applicable par toute entreprise ou équipe de conception du secteur. Le cadre de la méthodologie doit être suffisamment large pour permettre d'assurer que l'ensemble de ses nouveaux produits soit mis sur le marché avec la certitude que les étapes de conception, fabrication et distribution aient fait l'objet de décisions prenant en compte leurs impacts environnementaux. Il est alors nécessaire d'identifier les solutions les plus durables d'un point de vue environnemental sur le cycle de vie des produits.

Une méthodologie d'éco-conception adaptée aux concepteurs de produits microélectroniques sera proposée : tandis que la méthodologie globale sera orientée-produit, certains pans méthodologiques seront orientés-métier. Il s'agit de renseigner les concepteurs afin de favoriser l'apprentissage et l'intégration des connaissances environnementales en conception. La conception est à prendre au sens très large de tout ce qui contribue à définir les structures et les propriétés d'un produit sur son cycle de vie. Pour cela, des mécanismes d'interface seront développés à un niveau méthodologique liant l'étude des produits et l'expertise environnementale, grâce à des outils de modélisation et logiciels spécialisés. L'intégration de différents outils sera planifiée afin de systématiser la méthode d'éco-conception à l'ensemble des équipes et ainsi l'étendre à l'ensemble de la politique de l'entreprise et de ses parties prenantes.

3 Méthodologie de recherche

Le plan suivi pour l'élaboration de la méthodologie décrite dans la Figure 20. Comme nous l'avons mentionné en introduction, l'intégration de l'éco-conception dans des structures industrielles est liée à des modifications à différents niveaux (secteur, entreprise, individu). Une intégration réussie est ainsi précédée par l'identification des parties prenantes, l'évaluation de leur aptitude et flexibilité face au changement, les comportements et événements consécutifs à l'incorporation de nouveaux outils et méthodes. D'autre part, avant toute initiative de modification sur un produit (amélioration, re-conception ou innovation), un 'état des lieux' est recommandé, c'est-à-dire dire que les liens entre la conception et les impacts générés par un produit doivent être compris. L'appréhension et l'anticipation de ces obstacles nécessitent une bonne compréhension du cycle de vie du produit et des mécanismes de sa conception.

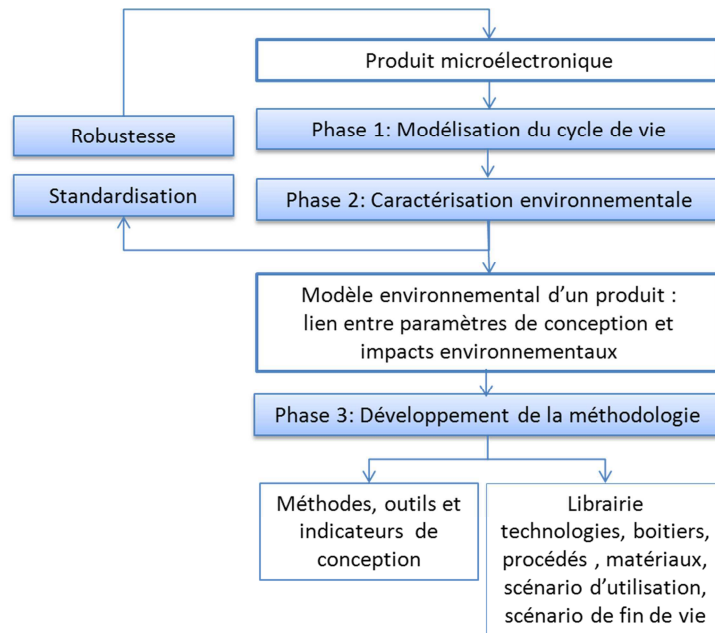


Figure 20 : Schéma de la méthodologie de recherche

La seconde étape de cette étude consiste en la caractérisation environnementale du cycle de vie d'un produit microélectronique quelconque, déjà existant. Le modèle ainsi imaginé devra être capable d'estimer les impacts environnementaux générés par un composant en fonction des différents paramètres propres à son cycle de vie. Dans un deuxième temps, le modèle sera testé afin de vérifier sa robustesse sur des produits structurellement différents et de fonctions différentes.

Cette modélisation sera accompagnée de la réalisation d'ACV de produits considérés sur leur cycle de vie. Comme on l'a vu, le produit microélectronique a la particularité d'utiliser une grande quantité de matériaux indirects, c'est-à-dire qui ne restent pas sur le produit. Cette spécificité montre qu'une attention particulière devra être portée sur les procédés de fabrication, en plus de la structure du produit. L'objectif de ces analyses est de s'informer sur les composants et les procédés de fabrication puis d'identifier ceux dont les impacts sont importants.

Une fois cette caractérisation environnementale du produit réalisée, la valeur ajoutée de ce projet de thèse est de fournir aux concepteurs les supports méthodologiques permettant d'évaluer à partir de critères environnementaux, n'importe quel nouveau produit. Les outils d'ingénierie consistent en l'implémentation d'un modèle capable de tester la charge environnementale des décisions de conception s'appuyant sur une modélisation des paramètres de conception et de la nature des composants. Ce modèle sera construit classiquement en s'appuyant sur l'étude de la littérature scientifique et des pratiques industrielles de STMicroelectronics. Il sera simulé, testé, calibré et appliqué sur des études de cas industriels.

La conception des outils s'accompagne de l'analyse précise des pratiques en conception afin de s'assurer que leur standardisation est possible et qu'ils pourront contribuer à l'intégration pérenne d'un système de gestion de l'environnement orienté-produit. Des bibliothèques (données environnementales relatives aux procédés, scénarii...) devront être mises à disposition des concepteurs. La méthode pour remplir ces bibliothèques sera incluse dans la méthodologie.

Partie II

Profil environnemental d'un produit microélectronique

Introduction à la Partie II

Nous partons de l'hypothèse que l'éco-conception dans l'industrie microélectronique est une approche systématique dans la conception de composants. Les contraintes liées aux impacts environnementaux sont considérées comme des facteurs décisifs à intégrer dans les stades préliminaires du développement de produits. Dans ce contexte, l'ACV est une méthode d'aide à la décision, fournissant des indications précises sur un large spectre d'effets environnementaux. La richesse de cette analyse environnementale tient au fait que différentes catégories d'impacts sont considérées. Toutefois, cet aspect complexifie l'analyse du profil d'un produit. Il est alors question de clarifier la charge et les principales pressions induites par un composant microélectronique, puis de souligner les piliers de la responsabilité environnementale des entreprises du secteur.

Pour rappel du vocabulaire introduit dans le chapitre 2, le composant microélectronique est un semi-conducteur, la puce, encapsulé dans un boîtier. La puce est fabriquée sur une plaquette et chacune contient quelques milliers de puces. Le terme technologie désigne à la fois la technologie semi-conductrice utilisée pour fabriquer la puce ainsi que le boîtier. Une unité fonctionnelle est associée : le composant est utilisé dans une application pour rendre un service demandé. Des produits sont comparés selon des scénarii d'utilisation et des fonctionnalités équivalentes.

Une méthode de caractérisation environnementale a pour objectif de mesurer les performances environnementales des composants et de juger de leur effet sur l'environnement et les ressources. Cette méthode sera notamment incluse dans les outils des concepteurs pour la détermination des impacts environnementaux des options de conception. Elle doit permettre d'aider le concepteur dans ses décisions: elle doit donc répondre aux attentes des concepteurs et être assez simple d'utilisation. Non-experts en analyse environnementale, les concepteurs ont légitimement besoin d'un moyen simple de juger des performances des décisions en conception. Par ailleurs, elle doit être scientifiquement acceptable c'est-à-dire correspondre à des effets, impacts ou dommages environnementaux réels et permettre de réduire de façon homogène l'impact des différents sous-ensembles et phases du cycle de vie de l'application qui contient le composant.

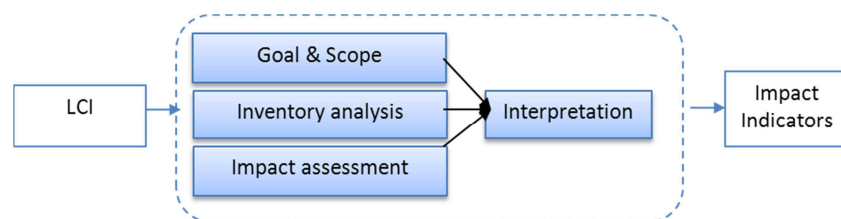


Figure 21 : Méthodologie d'ACV en quatre étapes

Une ACV est réalisée selon une méthodologie en quatre étapes (Figure 21). Sa mise en œuvre est soumise à de nombreuses hypothèses prises à chaque étape ce qui amènent des incertitudes sur les résultats de l'étude et diminuent la précision de cet outil. L'ensemble des problèmes, identifiés aujourd'hui, est décrit précisément dans des travaux de recherche, dont notamment ceux de [Jolliet'05], qui traduisent les limites de l'ACV tant au niveau conceptuel que pratique,. Dans une revue de l'état de l'art des problèmes rencontrés en ACV, [Reap'08-a] et

[Reap'08-b] ont identifié quinze problèmes majeurs. Les auteurs ont classé les problèmes par phase d'apparition. Le Tableau 8 synthétise les conclusions de cette étude où des facteurs de gravité et de pertinence de la solution actuelle sont attribués à chaque problème. Les efforts déployés par les chercheurs n'ont pas encore abouti à une solution unique, mais ceux-ci se rassemblent pour atténuer ces problèmes persistants.

Tableau 8 : Synthèse des problèmes actuels rencontrés en ACV (Adapté de [Reap'08-b])

Phase	Problème	Gravité	Pertinence
Définition des objectifs et du champ de l'étude	Définition de l'UF	4	3
	Sélection des frontières du système	4	3
	Impacts sociaux et économiques	3	4
	Considération de scénarios alternatifs	1	5
Réalisation de l'inventaire du cycle de vie du produit	Allocation	5	3
	Critère de coupure ('cutoff')	3	3
	Caractère unique de la technologie locale	2	2
Analyse de l'impact environnemental	Sélection des catégories d'impact	3	3
	Variations spatiales	5	3
	Caractère unique de l'environnement local	5	3
	Dynamique de l'environnement	3	4
	Dimension temporelle	2	3
Analyse des opportunités d'amélioration	Pondération et évaluation	4	2
	Incertitude du processus décisionnel	3	3
Toutes	Disponibilité et qualité des données	5	3

Un facteur de gravité égal à 1 signifie que le problème est minime et 5 qu'il est grave.

Un facteur de pertinence de la solution égal à 1 signifie que le problème est résolu et 5 qu'il est ignoré.

La partie II traite des techniques que nous avons mises en œuvre pour caractériser les impacts de n'importe quel produit microélectronique, à l'aide d'une ACV. Nous proposons une méthodologie permettant de faciliter la caractérisation des performances environnementales d'un produit sur son cycle de vie, en revenant sur les points bloquants que nous avons identifiés:

- l'inventaire de cycle de vie de la fabrication d'un produit (Chapitre 6) ;
- la sélection d'indicateurs appropriés aux spécificités du secteur industriel (Chapitre 7) ;
- la caractérisation du produit et de ses sous-systèmes (Chapitre 8).

On l'a vu, la qualité des données de l'ICV est un problème majeur pour la réalisation d'une ACV, aussi bien celles de la fabrication du produit que celles issues de fournisseurs relatives aux produits chimiques spécifiques utilisés en microélectronique. Nous ne traiterons pas directement cette problématique car elle retourne, non pas d'un problème de conception mais d'un problème d'organisation industrielle : nous proposons toutefois quelques pistes d'amélioration en Annexe 4.

Finalement, afin d'intégrer des critères environnementaux en conception, il faut identifier comment éco-concevoir les produits selon les caractéristiques du produit puis trouver les leviers permettant d'améliorer ses performances en fonction de la marge de manœuvre des concepteurs. Le Chapitre 9 conclut cette partie en dressant le modèle environnemental d'un composant sur son cycle de vie et nous permet d'obtenir la définition du produit éco-conçu en faisant le lien entre les paramètres de conception et leurs impacts environnementaux respectifs.

Chapitre 6 : Méthode de réalisation d'un inventaire du cycle de vie pour un composant

Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie pour la réalisation d'un inventaire du cycle de vie (ICV) adaptable à tout composant quelconque. L'ICV doit être suffisamment complet et précis pour l'analyse environnementale ultérieure, mais sa mise en œuvre doit être compatible avec la complexité de l'organisation industrielle (temps minimal alloué par les équipes à la collecte de données, disponibilité des informations).

1 Difficultés dans la réalisation de l'ICV pour la fabrication d'un composant

Hormis la collecte de données, les principales difficultés sont les suivantes :

- une même ligne de production produit des centaines de produits différents ;
- des outils de production sont utilisés plusieurs fois pour la fabrication d'un même produit ;
- la conservation de l'environnement ultra-pur est à l'origine de l'utilisation d'une importante quantité de consommables (électricité, eau), qui peut être majoritaire par rapport à la consommation directe par les outils de production.

On observe également d'autres spécificités, de moindre importance :

- une même étape du procédé peut être réalisée indifféremment par des équipements de différentes générations et donc possédant des propriétés différentes ;
- certains outils de production ne sont utilisés que par une partie des produits ;
- la complexité des produits est très variable ainsi que les temps de cycle.

De ces différents constats, on comprend qu'il est difficile d'attribuer un flux de consommables (débit ou masse) à la fabrication d'un produit en particulier. Pour définir l'impact sur l'environnement généré par un produit, il s'agit de structurer la méthode d'ICV afin de s'adapter aux contraintes spécifiques de l'organisation de la production des composants. Pour le but qui est le nôtre, c'est-à-dire, éco-concevoir des produits, il faut aussi veiller que les résultats de l'ICV soient spécifiques et permettent de tirer des conclusions pour diminuer l'empreinte environnementale d'un composant en particulier ou d'une famille de composants.

2 Approche pour la réalisation d'un ICV

2.1 Principe de l'approche *bottom-up*

Les flux exacts (entrants et sortants) sont inventoriés pour un produit, et pour l'ensemble des procédés de fabrication. La méthode est précise et permet que les calculs d'impacts soient directement réalisés sur les quantités exactes consommées et émises. Outre la difficulté de la collecte de telles informations dans un environnement industriel, cette approche ne peut être utilisée pour évaluer l'empreinte environnementale de l'environnement ultra-pur de production

pour un composant en particulier. Ainsi, il n'est pas recommandé d'utiliser cette approche pour estimer l'empreinte environnementale de la fabrication d'un composant.

2.2 Principe de l'approche top-down

Une solution pour simplifier le problème de la collecte, et notamment pour les impacts dus à la conservation de l'ambiance ultra-pure de la salle blanche, consiste à répartir les impacts entre les coproduits en utilisant des lois d'allocation : les résultats d'impacts sont multipliés par un facteur, fonction des propriétés intrinsèques des produits. Allouer un flux est le fait de répartir un flux d'entrée ou de sortie d'un processus entre le système étudié et les autres systèmes. Cette allocation est généralement massique, énergétique ou économique, en fonction de la nature des coproduits.

La méthode top-down est une approche globale où les consommations et émissions globales d'un système (ici le site de production) sont considérées puis allouées à une partie du système considéré en utilisant des lois d'allocation. Les flux pris en compte sont ceux de la production directe par les outils et ceux dus aux « facilités » pour l'ambiance de la salle blanche. Les incertitudes de cette méthode sont dues à la définition des lois d'allocation. Bien que cette méthode ait l'avantage de prendre en compte l'ensemble des consommations, une erreur importante est due au fait que certains produits chimiques ou procédés peuvent être pris en compte dans le calcul d'impacts alors qu'en réalité ils n'interviennent pas dans le processus de fabrication du système considéré.

En front-end, le système considéré, la plaquette de silicium, est découpé en plusieurs sous-systèmes dans le but d'attribuer à une plaquette produite les consommations et émissions qui lui sont propres. Les sous-systèmes sont les niveaux de masques correspondant à ces séquences bouclées d'étapes de production. La complexité d'une technologie semi-conductrice est fonction de plusieurs paramètres : la dimension critique, le nombre de masques photolithographiques car il correspond directement au nombre de boucles de procédés, le nombre de lignes de métal correspondant au routage entre les blocs fonctionnels, le nombre de niveau de poly-silicium relatif à la fois à complexité et à la diversité des cellules. Afin de couvrir l'ensemble des technologies existantes, aussi bien analogiques que digitales, la meilleure loi d'allocation suggérée par les experts est le nombre de masques. Les masques sont relativement homogènes entre eux, par le nombre et la nature des étapes de fabrication mises en jeu.

En back-end, la quantité de connexions produites dans un site est l'unité de référence utilisée sur les sites pour les comptes-rendus environnementaux. Cette unité caractérise la complexité du boîtier. En effet, la consommation de produits chimiques et métaux ainsi que le temps de cycle augmentent chaque fois qu'une connexion supplémentaire est soudée. On note toutefois les limites de la fiabilité de cette méthode d'allocation car de nombreuses différences existent entre les familles de boîtier : matériel de la matrice d'encapsulation (céramique, métal, verre, plastique moulé, etc.), le type de connexion (patte en métal, bille connectée par des bump, bille soudée directement sur la puce).

L'utilisation d'une approche top-down n'est pertinente que si les activités industrielles sont homogènes, c'est-à-dire les technologies et procédés utilisés pour la fabrication sont analogues et comparables entre les sites. Dans les usines de front-end, les plaquettes de silicium sont traitées selon des cycles itératifs de traitement de surface, appelés niveaux de masque. Tout semi-

conducteur peut être vu comme une série de niveaux de masques et sa complexité est directement dépendante du nombre de masques. En back-end, il existe une vingtaine de familles de boitiers. Dans chaque famille, seule la taille et le nombre d'interconnexions (pattes ou des billes) diffèrent. La production est également comparable d'une usine à une autre : les observations faites au niveau d'un site peuvent être interprétées au niveau d'un produit, en veillant toutefois à tenir compte des différences entre les sites relatives aux performances du système de gestion de l'environnement.

2.3 Cohérence des deux approches et préconisation d'utilisation

Les deux méthodes présentées ci-avant ont des avantages et défauts distincts. Une comparaison qualitative des deux approches est présentée dans le Tableau 9, tandis que les Tableau 10 et Tableau 11 présentent la même comparaison, quantitative cette fois sur deux technologies.

Tableau 9 : Comparaison des deux approches de l'inventaire de cycle de vie

Approches	Avantages	Défauts
Top-down	Flexible et rapide à mettre en œuvre Prise en compte des consommations et émissions associées à l'activité d'un site de production	Nécessite beaucoup d'approximations Non spécifique à une technologie
Bottom-up	Spécifique à une technologie	Long Non prise en compte des facilités Risque de mauvaise qualité de l'ICV

Tableau 10 : Comparaison des 2 approches sur les quantités estimées de flux entrants (technologie T1)

Produits chimiques (liquides et gazeux)	Différence %
Tetraethyl orthosilicate	59,30%
Résine photosensible	52,06%
Solvant	23,76%
CF4	19,69%
C4F8	9,05%
Slurry	-29,97%
Tetra-methyl-ammonium hydroxide	59,30%

Tableau 11 : Comparaison des 2 approches sur les quantités estimées de flux entrants (technologie T2)

Produits chimiques (liquides et gazeux)	Différence %
Acide fluorhydrique	89.51%
Tetraethyl orthosilicate	60.60%
Résine photosensible	28.89%
Dioxygène	69.03%
CF4	71.76%
C4F8	20.89%
Slurry	-17.18%
Developer	15.87%
Consommation d'électricité	Différence %
Facilités	x
Equipements de production	-16.21%

La comparaison quantitative concernant l'utilisation de quelques produits chimiques et d'électricité dans la fabrication, montre que les deux approches ne sont pas équivalentes et conduisent à des résultats divergents. La comparaison de deux objets (plaquette ou boîtier) permet également d'évaluer la robustesse des lois d'allocation d'une technologie (ici pour la fabrication de la puce) à une autre, issues de sites différents et de complexités technologiques inégales.

La méthode top-down surévalue globalement les quantités car elle alloue au processus de fabrication les quantités consommées pour les rebuts de production, les prototypes et les produits chimiques « gaspillés ».

La méthode bottom-up a, quant à elle, tendance à sous-évaluer les quantités car lors de l'inventaire certaines variations du processus n'ont pas été prises en compte comme les 'reworks' (la plaquette repasse par certaines étapes du processus de fabrication, si un test ne donne pas les résultats attendus) ou certains nettoyages, ponctuels et récurrents.

Il apparaît qu'elles sont relativement efficaces pour certains produits uniquement utilisés par des procédés de fabrication donnés (développeur et résine en photolithographie, C4F8 dans les plasmas) mais totalement inefficaces pour des produits utilisés à la fois dans les processus de fabrication et pour l'ambiance de la salle blanche (oxygène) ou pour les nettoyages d'équipements (acide fluorique). Toutefois, d'une technologie à une autre, l'estimation d'une même substance peut être faite avec plus ou moins de succès : par exemple, pour le cas du slurry, les résultats sont instables. Ceci s'explique par le fait que les slurries sont utilisées en grande quantité, notamment chaque fois qu'une ligne de métal doit être polie. La consommation de slurries est proportionnelle aux nombres de lignes de métal et non au nombre de masques d'où la non-robustesse de la loi d'allocation dans ce cas.

En résumé, la méthode top-down ne peut être utilisée pour faire de l'optimisation à l'échelle du procédé, ni à l'échelle de la technologie. L'approche bottom-up est alors la seule utilisable pour décrire une activité de production dans le détail : caractériser les performances environnementales de la fabrication d'un composant, d'un objet ou d'un procédé. C'est la méthode qui sera utilisée pour donner des informations aux ingénieurs sur les propriétés environnementales des procédés et des technologies de fabrication et plus tard pour les optimiser.

Cependant, la méthode top-down est utilisée à d'autres fins. En effet, bien que les résultats top-down ne soient pas pertinents pour caractériser précisément la fabrication d'un produit, les résultats macroscopiques sont exploitables car les ordres de grandeurs sont cohérents entre les deux approches. Les résultats top-down sont alors intéressants car ils prennent en compte l'ensemble des flux d'un site : ils peuvent être exploités pour dégager des tendances sur les technologies et la répartition des impacts par famille de technologies. La mise en place d'indicateurs sur d'ACV dans le système de gestion environnementale d'un site industriel est pertinente pour aller au-delà du système de gestion classique : l'ACV, en apportant de nouveaux indicateurs, donne des perspectives pour la diminution et l'optimisation des consommations sur les sites.

La mise en place d'indicateurs sur les résultats d'ACV dans le système de gestion environnementale d'un site industriel est pertinente pour aller au-delà du système de gestion classique : l'ACV, en apportant de nouveaux indicateurs, donne des perspectives pour la diminution et l'optimisation des consommations sur les sites.

2.4 Proposition pour l'inventaire de cycle de vie de la fabrication d'un composant quelconque : méthode hybride de collecte des données

Comme on vient de le voir les approches, bottom-up et top-down, présentent des avantages différents, tant au niveau de la mise en œuvre que de la qualité des résultats. La Figure 22 présente les choix réalisés pour segmenter la collecte de données.

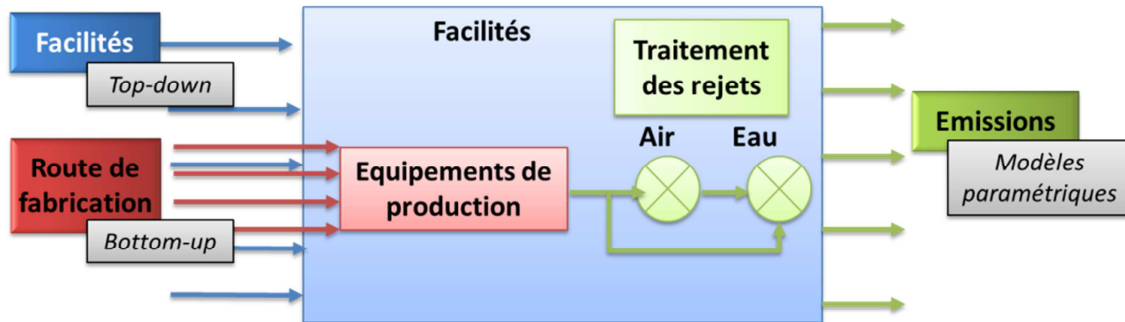


Figure 22 : Segmentation de l'ICV et méthode préconisée

Du fait que le problème réside principalement dans l'allocation des flux de facilité, seule l'approche top-down est appropriée. Quelle que soit la production dans la salle blanche à un instant donné, nous supposons que les consommations sont quasiment constantes. Cette hypothèse est assez réaliste car les conditions dans la salle blanche, pression, flux d'air et température, sont constantes et les équipements sont laissés en veille lorsqu'ils ne produisent pas. La charge environnementale d'un produit est fonction du temps passé par la plaquette dans les équipements de production, d'assemblage et de test.

Toutefois, le cycle de production est très largement variable en fonction de la priorité donnée dans les délais de production : le temps de cycle, mesuré en jour, n'est donc pas un paramètre d'allocation satisfaisant. Nous suggérons que les consommables des facilités soient alloués en fonction du nombre d'opérations de production par lequel la plaquette passe, sans distinction sur la nature de l'opération. Le nombre total d'opérations de production réalisées sur un site étant connu sur une année, la collecte est faite avec le support des équipes-facilités sur une année de référence, le plus simple étant de collecter les flux lors d'éventuels arrêts de production.

$$x = \frac{X}{N} \times n$$

Avec x : valeur d'un paramètre de facilité alloué à la fabrication d'une unité de production
 X : valeur d'un paramètre de facilité sur l'année de référence
 N : nombre d'étapes sur l'année de référence pour l'ensemble de la production
 n : nombre d'étapes pour la fabrication d'une unité de production

L'inventaire des données relatives à la route de production est réalisé avec une approche bottom-up. Pour chaque étape, les flux entrants sont collectés avec l'aide des ingénieurs-procédé : ce sont les consommables des recettes. Ces données sont connues ou facilement retrouvables.

En revanche, les ingénieurs-procédé, en charge de la mise en œuvre des recettes donc des flux entrants des procédés, n'ont aucune information relative aux flux sortants. Bien que les mécanismes

théoriques des réactions physiques et chimiques soient connus, la nature et les quantités exactes de coproduits ne sont pas calculées précisément et ces données ne sont ni suivies ni enregistrées. C'est pourquoi, le traitement des différents rejets par les infrastructures de traitement est évalué à l'aide de scénarios moyens. L'utilisation de modèles paramétriques spécifiques à l'utilisation unitaire de produits chimiques est requise. Le scénario moyen de traitement de chaque rejet est décrit :

- l'utilisation de consommables par les unités de traitement (laveurs de gaz, station de traitement des eaux usées) ;
- les rendements des infrastructures d'abattage ;
- les émissions relatives dans l'air et dans l'eau y compris celles dues aux coproduits des unités de traitement.

Les incertitudes sont alors majoritairement issues de l'estimation de la composition des flux sortants de l'équipement et des hypothèses suivantes :

- les coproduits de réaction sont négligés ;
- la matière entrante gazeuse ou liquide n'est pas altérée ;
- seules les masses de métaux déposés par PVD, CVD ou électrolyse restant sur la plaquette, ne sont pas comptabilisées en sorties du procédé.

Cet inventaire et les modèles de traitement des matériaux sont réalisés pour une année de référence avec l'aide des équipes-environnement des sites. Pour chaque matériau, on retrouve ainsi une fiche environnementale comprenant les impacts de sa fabrication, de sa distribution jusqu'au site et du fait de son traitement et son rejet dans un environnement donné. Pour réaliser la fiche environnementale d'un matériau, il s'agit de clairement identifier la substance et son rôle dans la fabrication, un même matériau possédant autant de fiches que d'ateliers dans lesquels il est utilisé. Dans l'Annexe 5, nous présentons l'exemple de la fiche environnementale de l'hexafluorure de soufre dans une chambre de gravure.

Le développement de modèles paramétriques pour le traitement unitaire de produits chimiques est lié à un nombre important d'approximations. La formation des coproduits du traitement des effluents liquides, comme les boues d'activation, est le résultat de transformation complexe de la matière. L'allocation réalisée ici est donc difficile et la modélisation requiert l'assistance des ingénieurs en charge de la station de traitement des eaux usées. On trouve encore d'autres cas particuliers : par exemple, les brûleurs de COV limitent la pollution due à l'évaporation de solvants organiques mais certaines émissions de COV ne peuvent être contrôlées. Il est impossible d'évaluer la quantité exacte de COV émise et encore moins de l'attribuer à un produit donné.

3 Simplification de l'ICV par la segmentation de la phase de production

Du fait de la complexité de la fabrication d'un composant, certaines mesures doivent être prises lors de la collecte de données. Ces mesures ont pour but de simplifier et accélérer la collecte de données lors de l'inventaire de cycle de vie.

3.1 Description des technologies de fabrication et segmentation de la route

Selon le niveau de détails souhaité pour la modélisation du cycle de vie d'un produit³⁰, le produit est regardé sous différents niveaux d'abstraction.

On peut décrire un boîtier ou une technologie comme un ensemble de blocs, eux-mêmes composés d'étapes de procédés de fabrication. Un bloc correspond à la fabrication d'une entité matérielle ou physique du produit. Pour une technologie, les blocs sont des niveaux de masque regroupés pour former des plus gros ensembles. Un bloc n'est pas nécessairement lié à l'apport de matière mais plutôt à la formation ou l'assemblage d'entités pendant la fabrication du produit. La fabrication des blocs, par une série de procédés, consomme des matériaux et de l'énergie qui génèrent des effets sur l'environnement de par leur fabrication, distribution, utilisation et traitement.

La fonction d'une technologie semi-conductrice est de supporter la fabrication d'un circuit électrique. La réduction de taille d'une génération à une autre est prise en compte en intégrant le nombre de produits sur une même plaquette. Une technologie semi-conductrice est fabriquée selon une route de plusieurs centaines d'étapes. La modélisation environnementale d'une telle technologie est complexe si l'on doit considérer la route étape par étape. Cette route est divisée en une vingtaine de modules qui eux-mêmes comprennent des niveaux de masques ou des étapes de procédés élémentaires (Tableau 23).

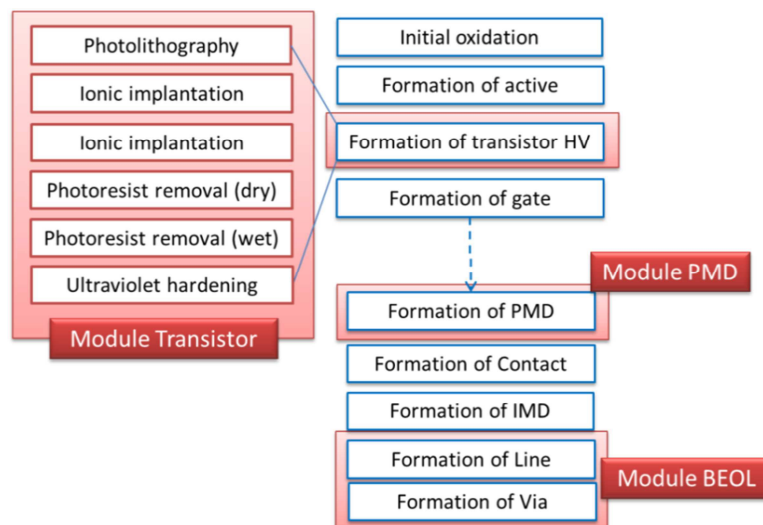


Figure 23 : Segmentation de la route de fabrication d'une puce en modules

A partir de l'expérience des technologues, treize modules ont été identifiés pour la modélisation de n'importe quelle technologie NVM. Il existe des modules obligatoires, i.e. que pour une technologie NVM il existe forcément un ou plusieurs niveaux de masque dans la route de fabrication destiné(s) à fabriquer ces éléments obligatoires. D'autres paramètres sont nécessaires pour couvrir l'ensemble de la route de fabrication : la formation des différents types de transistors ou l'ajout de certaines options. Le Tableau 12 résume les différents modules et paramètres segmentant la route de fabrication d'une puce et permettant sa description à partir d'un nombre réduit de paramètres.

³⁰ Le terme « Life Cycle Modelling » ou « LCM » est communément utilisé pour cette notion de modélisation du produit sur son cycle de vie à des fins de caractérisation environnementale ou non.

Pour faire l'analogie avec une voiture, les modules obligatoires sont les entités nécessaires au fonctionnement de la voiture (roues, moteur) ou à la sécurité du conducteur (rétroviseurs) tandis que les modules optionnels sont des caractéristiques de la voiture pour le confort du conducteur (air bag et systèmes d'aide au freinage) ou pour aider à l'assemblage du véhicule (rivet, châssis).

Tableau 12 : Description d'une puce fabriquée avec une technologie NVM à partir de paramètres

Type	Paramètres de la puce
A : Modules obligatoires	Cell
	Active
	Floating gate
	Salicide protection
	Salicide
	Contact
	Spacer
	Back end of line
	Poly-metal dielectric
	Gate
	Inter-metal dielectric
	Passivation
	Traitement plaquette en début et fin de procédé
B : Modules optionnels	
C : Autres paramètres de la puce	Nombre de lignes
	Dernière ligne aluminium (Fin ou épais)
	Matrix (Simple ou double)
D : Transistors embarqués	High voltage
	Low voltage
	Medium voltage
	Ultra high voltage
	High speed

Le processus d'assemblage pour l'encapsulation dans le boîtier est moins long que la fabrication de la puce. On compte entre 15 et 20 étapes. Contrairement à la fabrication de la puce, l'assemblage du boîtier est réalisé sur une ligne de production spécialisée pour chaque type de boîtier. Sur les lignes, plusieurs étapes de procédés s'enchaînent assimilables à des ateliers. Le nombre d'étapes étant limité, il est inutile d'utiliser ce principe de regroupement : chaque étape du processus d'assemblage est modélisée. La segmentation en modules est plus aisée puisqu'elle correspond aux différentes phases d'assemblage sur la ligne de production. Par la suite, on nommera également « modules » un regroupement d'étapes de production formant une entité précise du boîtier.

3.2 Simplification de la collecte par la segmentation de la route de fabrication

La route de fabrication d'un semi-conducteur se décompose en une série de boucles, elles-mêmes composées d'une dizaine d'étapes élémentaires qui se répètent. Les mêmes procédés sont répétés dans les boucles. Ainsi, il existe un nombre réduit de procédés différents du fait de leur technique de fabrication. C'est pourquoi il est acceptable de segmenter la route en réalisant un modèle de quelques étapes représentatives, scrupuleusement sélectionnées.

L'usine de fabrication est divisée en plusieurs zones dites « ateliers », chaque atelier correspondant à un type de procédé. On définit l'unité fonctionnelle d'un atelier (Tableau 13). La

fonction d'un procédé est d'ajouter un élément ou changer une propriété pendant la fabrication de la puce ou l'assemblage du boîtier. Plusieurs techniques sont susceptibles d'obtenir le même résultat. Par exemple, une couche d'oxyde est obtenue par un dépôt de type CVD ou par croissance avec un procédé de diffusion.

Les étapes de chacun des ateliers sont regroupées en fonction de leur « unité de résultat ». Ce regroupement est appelé « groupe de résultat ». Une unité de résultat est l'expression du résultat d'un processus. Elle peut être mesurable ou observable et est spécifique à une zone de production ou une technique de production et peut être dépendante de l'équipement, d'une substance spécifique ou du principe physique utilisé.

Un calcul de la propagation d'une recette à l'autre dans un même groupe est effectué. L'écart entre les principales sources de dommages sur les catégories d'impact considérées doit être le plus faible possible. S'il est trop important, un autre groupe de résultat est créé.

Tableau 13 : Unité fonctionnelle des ateliers – fabrication de la puce et du boîtier

Procédé	Unité fonctionnelle
Implantation ionique	Planter des espèces dopantes dans le silicium
Nettoyage	Nettoyer pour décontaminer ou retirer de la matière
Diffusion	Déposer des couches ou traitement thermique
Gravure	Graver dans les couches pour dessiner les motifs
PVD	Déposer des couches par voie physique
Electrodéposition	Déposer des couches par électrolyse
CVD	Déposer des couches par voie chimique
CMP	Polir la plaquette mécaniquement et chimiquement
Photolithographie	Dessiner des motifs en insolant une résine photosensible
Câblage filaire	Connecter les pads de la puce au substrat par un fil métallique
Collage	Coller la puce au substrat
Balls attach	Souder les billes à la puce
Underfill	Déposer une couche de résine pour combler l'espace entre la bille et le substrat PCB
Flip chip	Connecter la puce au boîtier par les pads
Isolation de la puce	Amincir puis scier la plaquette pour isoler la puce
Moulage	Encapsuler la puce dans une résine protectrice

- Exemple de segmentation sur un composant quelconque

Pour la puce pour laquelle un inventaire complet des étapes de fabrication a été réalisé, nous avons trouvé 42 groupes, reportés dans le Tableau 14. En pratique, cela signifie que seulement un nombre réduit d'étapes de processus élémentaires est modélisé. Pour chaque groupe, la nature et l'ordre de grandeur des entrants (électricité, matières premières) sont similaires. Le nombre d'étapes comprises dans un groupe est noté à titre indicatif.

Ces groupes ont été définis en fonction de l'atelier, du principe physique utilisé et des unités de résultats. Lorsque des écarts importants étaient observés entre certains flux d'entrée, la sensibilité de ces flux sur le calcul d'impacts a été calculée par la réalisation d'une ACV de différentes étapes. Si l'écart s'avère important par rapport au seuil de tolérance fixé, un nouveau groupe est défini.

Tableau 14 : Liste des groupes de résultats pour la fabrication d'un composant

Atelier	Groupes*	Nombre d'étapes appartenant au groupe (%) **
CMP	Polish wafer surface after copper deposit	1.027
	Polish wafer surface after oxide deposit	0.685
	Polish wafer surface after tungsten deposit	0.342
Electrolyse	Depose a copper layer by electrolyze	1.027
CVD	Deposition of oxide by chemical vapor process	1.712
	Chemical vapor deposit process on [REDACTED] equipment	2.397
	Chemical vapor deposit process on other equipments	1.712
	Tungsten deposit by chemical vapor deposition	0.342
	Other metals deposit by chemical vapor deposition	1.370
PVD	Metal deposit by physical vapor deposition	1.712
Gravure	Etch wafer surface on metal layer	1.370
	Etch wafer surface on oxide layer	3.425
	Etch wafer surface on poly layer with SF6	0.685
	Etch wafer surface on poly layer without SF6	1.027
	Etch wafer surface on poly layer without Chlorine and Helium	0.685
	Remove resist with dry treatment on [REDACTED] equipment	2.740
	Remove resist with dry treatment on [REDACTED] equipment	2.397
	Surface dry treatment	7.534
Photolithographie	Photolithography with [REDACTED] resist	4.452
	Photolithography with [REDACTED] resist	5.822
	Photolithography with [REDACTED] resist	1.712
	Photolithography without BARC	2.740
Implantation Ionique	Implant bore atoms	3.767
	Implant phosphorous atoms	3.425
	Implant Fluor atoms	1.370
	Implant arsenic atoms	1.712
	Hardening of resin by ultraviolet treatment	2.740
Diffusion	Low pressure chemical vapor deposition process	4.452
	Oxidation by diffusion	2.055
	Anneal by diffusion	1.712
	Rapid thermal oxidation	1.712
	Rapid thermal anneal	2.740
Nettoyage	Remove resist with wet treatment	7.192
	Clean with HF	1.027
	Clean of wafer back side	4.110
	Clean with scrubber	11.644
	Clean with BOE	0.685
Assemblage du boitier	Back grinding	0.342
	Die sawing	0.342
	Molding	0.342
	Cleaning	0.342
	Flip chip	0.342
	Balls attach	0.342
	Molding	0.342
	Singulation	0.342

*Les données de ce tableau confidentielles sont masquées

**Les valeurs sont ramenées en pourcentage pour des raisons de confidentialité

Une fois la segmentation de la route réalisée et les groupes créés sur un exemple d'une puce représentative, l'ICV d'une puce fabriquée avec une nouvelle technologie est beaucoup plus rapide :

- Si un module de la nouvelle technologie a déjà été développé sur une précédente technologie, alors le calcul d'impact est récupéré de la précédente génération de technologies
- Sinon le module est nouveau. Dans ce cas,
 - si les étapes du module appartiennent à des groupes de résultats précédemment définis, alors le calcul d'impact a déjà été réalisé ;
 - si certaines étapes sont nouvelles du fait du principe physique utilisé, de la famille de l'équipement, ou de l'ajout d'une nouvelle substance dont l'impact est non-négligeable, alors un nouveau groupe est créé.

4 Conclusion de chapitre 6

Pour simplifier la modélisation environnementale du cycle de vie d'un produit et plus particulièrement sur la phase de production du semi-conducteur, différentes propositions sont faites dans cette partie :

- Un encadrement de la modélisation du cycle de vie d'un produit en spécifiant une méthode hybride de collecte de données, telle que présenté dans la Figure 22.
- La limitation du nombre d'étapes à collecter par la segmentation de la route de fabrication en modules et en regroupant les procédés dans des groupes de résultats, réunis par une unité fonctionnelle. Cette proposition a été mise en œuvre sur un exemple concret (Tableau 14), afin de s'assurer de sa faisabilité et de son intérêt.

La méthode ainsi simplifiée permet de réaliser l'inventaire du cycle de vie d'un produit avec une méthode bottom-up, rendant les effets de la complexité et des différences de technologies, tout en réduisant le temps de réalisation et en garantissant de contourner les difficultés précédemment identifiées.

Chapitre 7 : Sélection d'indicateurs pour l'industrie microélectronique

Les résultats d'une analyse de cycle de vie sont présentés sous la forme d'un profil, qui donne une base pour contrôler l'état de l'environnement du produit et suggérer des façons de l'améliorer. En théorie, le schéma doit prendre en compte tous les aspects: changement climatique, qualité des écosystèmes, biodiversité..., sans pour autant minimiser ou intensifier un effet plutôt qu'une autre. La raison qui pousse à considérer différents aspects est d'éviter les transferts d'impacts : une initiative industrielle qui améliorerait un type d'impact pourrait conduire à en détériorer un autre, qui avait été jusque-là négligé. Cependant, chaque industrie a ses propres préoccupations et doit agir en priorité pour réduire les impacts les plus significatifs.

Ce chapitre contribue à l'élaboration d'un ensemble approprié d'indicateurs environnementaux pour l'industrie des semi-conducteurs et fournit des éléments scientifiques pour la définition d'une norme ou d'un standard. Les indicateurs auront plusieurs rôles :

- Clarifier la nature des pressions qu'un produit microélectronique exerce sur l'environnement ;
- Répondre à la nécessité d'alerter le secteur microélectronique sur les questions environnementales pour lesquelles elle a des responsabilités réelles, avec une vision sur le « cycle de vie » d'un produit et qui ne porterait pas que sur les seules activités des sites de production;
- Fournir aux équipes dirigeantes des éléments décisifs pour aider les politiques industrielles à réduire l'empreinte environnementale des activités en agissant sur les impacts du cycle de vie ;
- Etre utilisés à des perspectives d'éco-conception : le concepteur cherchera à diminuer ou, du moins, à limiter les effets environnementaux des produits futurs.

Considérant que le choix d'indicateurs peut être fait pour des facteurs tels que l'image, la communication sur les efforts déjà accomplis et la facilité de collecte de données [Olsthoorn'01], la détermination scientifique d'indicateurs exige une analyse approfondie de chaque étape du cycle de vie. Les effets d'un produit sur l'environnement sont visualisés à travers l'approche développée par l'OCDE appelée DPSIR (driving force, pressure, state, impact, response) [Lutz'08], que nous appellerons par la suite respectivement : levier, pression, état, impact, réponse. Cette méthode a été développée afin de clarifier les causalités entre les actions de la société et les conséquences sur l'environnement et les écosystèmes, et aussi d'identifier les besoins d'actions et d'améliorations. Nous avons donc choisi d'appliquer l'approche DPSIR à l'industrie microélectronique. Premièrement, les données et les informations des éléments de la chaîne sont collectées. Les préoccupations des parties prenantes sont étudiées par le biais de la réglementation, des clients, des experts et de considérations économiques. Puis, les impacts réels générés par le cycle de vie du composant sont considérés par le croisement de deux approches:

- top-down : considérant des tendances à une échelle macroscopique ou sectorielle ;
- hybride : à partir de résultats d'ACV.

1 Etude du contexte : cartographie des interactions du secteur microélectronique avec l'environnement

1.1 Pressions extérieures

Une entreprise se positionne à partir de l'interprétation du contexte concurrentiel, économique et social. Il en est de même pour la stratégie environnementale déployée par les entreprises. Pour comprendre les pressions extérieures, nous étudierons celles formulées par la société et le marché.

- *[Pressions formulées par la « société »](#)*

Comme le produit microélectronique est directement intégré dans des applications électroniques, il n'est pas vendu au grand public directement mais à des groupes industriels : il n'est pas une cible des ONG ou des consommateurs. Actuellement, les actionnaires sont à l'origine des pressions, matérialisées par les demandes des agences de notation extra-financière. Les préoccupations de ces organismes concernent trois thématiques : la stratégie climatique, les risques liés à l'eau et ceux liés aux produits chimiques dangereux.

- *[Pressions formulées par le « marché »](#)*

Le profil environnemental d'un composant est dépendant de l'application dans laquelle il est intégré. La sélection des aspects significatifs ne peut pas alors être découplée des requêtes formulées par les clients. Les indicateurs doivent couvrir les mêmes préoccupations que celles des clients sans perdre les spécificités de la microélectronique.

Les TIC sont les clients historiques de la microélectronique, mais depuis plusieurs années, des équipements plus communs, comme les machines à café, les voitures, les cartouches d'encre ou des applications médicales ont intégré des fonctions électroniques. La diversification du marché conduit à une multiplication des obligations environnementales. Par exemple, le secteur électronique est confronté au problème croissant des déchets, ce qui a conduit à un nouveau cadre législatif.

Par ailleurs, l'Union Internationale des Télécommunications (ITU) a mis l'accent sur l'évaluation de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Ce champ d'étude, assez limité, s'explique par l'émergence de programmes internationaux comme le « Carbon Disclosure Project » ou le « GHG Protocol », dont l'application a requis de nombreux travaux. Selon les résultats de groupes de travail comme l'ITU en 2010³¹, d'autres impacts tels que l'épuisement des ressources ou le stress hydrique seront abordés ultérieurement.

Dans le secteur automobile, les efforts se concentrent sur la phase d'utilisation (limitation des gaz d'échappement) et sur la fin de la vie du fait de réglementations. L'industrie travaille sur ses véhicules sur des problématiques de DfD (Design for Dismantling) et de DfR (Design for Recycling).

1.2 Responsabilités du secteur microélectronique

Les fabricants sont regroupés en associations, par exemple ESIA pour l'Europe, pour défendre leurs intérêts au niveau régional, national ou mondial. Les rapports qu'elles publient reflètent les tendances propres au secteur. Les préoccupations de l'ITRS (International Technology Roadmap for

³¹ International Telecommunication Union, 2010. ICTs and Environmental Sustainability. 5th ITU Symposium. www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F0060160001PDFE.pdf.

Semiconductors) sont relatives au réchauffement climatique et la consommation d'énergie. L'International SEMATECH³² (2009) a mis au point selon l'ISO14031 pour le secteur microélectronique des KEPI (Key Environmental Priority Indicators), indicateurs « qui fournissent des informations sur les performances environnementales d'une organisation »³³. Ces KEPI couvrent un ensemble restreint de préoccupations: réchauffement climatique, ressources en eau, consommation de produits chimiques et impacts dus à la production de déchets. Aucune classification des produits chimiques n'est proposée rendant impossible toute évaluation de la gravité. Cet ensemble d'indicateurs est utile pour les entreprises et la pratique de « benchmark », mais n'est pas associable aux impacts réels générés par les composants.

Afin de comprendre les relations de l'industrie avec le monde extérieur, huit interviews ont été menés avec les principaux acteurs de la stratégie environnementale de STMicroelectronics. Le fait de considérer une entité représentative permet de généraliser les conclusions menées par cette étude. L'entreprise est représentative du secteur car :

- ses sites situés dans le monde entier, dédiés aux semi-conducteurs;
- les produits qu'elle conçoit et fabrique sont compétitifs sur le marché international.

Les professionnels interrogés sont les Corporate Business Managers s'occupant de la stratégie environnementale de la société, les experts sur les sites traitant les problèmes locaux liés aux sites de production et les gestionnaires de l'environnement dans les centres R&D où les produits sont conçus. Comme les problématiques environnementales sont différentes, les sites front-end et back-end sont étudiés séparément. Sur la base d'une sélection préalable de thèmes choisis en fonction de leur disponibilité dans le logiciel d'ACV SimaPro, la question posée était « classer par ordre d'importance les thématiques les plus sensibles de votre secteur d'activité ». Les réponses sont résumées dans le Tableau 15 et le Tableau 16. Certains impacts sont dépendants de l'emplacement des usines et de l'efficacité des unités de traitement : dans ce cas il peut y avoir plusieurs notes.

Tableau 15 : Interactions entre l'environnement et les centres de R&D

Impacts	Centres R&D	Raisons pour maîtriser les impacts / Niveau souhaité de responsabilité sur le site
Réchauffement climatique	+++	Demandes extérieures sur l'empreinte carbone des composants ; Efficacité énergétique (EuP)
Santé	+++	Substances dangereuses (RoHS)
Déchets	+	Pas de responsabilité sur la fin de vie du composant mais des clients demandent d'enlever certains alliages délétères pour le recyclage
Acidification, eutrophisation, occupation des terres, bruits, odeurs, amenuisement de la couche d'ozone, oxydation photochimique, toxicité, stress hydrique	=	
Ressources	-	Réduction de la surface des puces et des dimensions des boîtiers

³² Le SEMATECH est un consortium à but non lucratif dont les travaux sont centrés sur la recherche fondamentale dans le domaine de la fabrication de semi-conducteurs.

³³ International SEMATECH, 2009. Semiconductor Key Environment Performance Indicators Guidance. www.sematech.org/docubase/document/5069aeng.pdf.

Tableau 16 : Interactions entre l'environnement et les usines de production

Impacts	Front end	Back end	Raisons pour maîtriser les impacts / Niveau souhaité de responsabilité sur le site
Toxicité dans l'eau	++	+++	Beaucoup de produits chimiques; Risque d'effets toxiques pour la santé et les écosystèmes par contamination des eaux
Réchauffement climatique	+++	+++	Emissions directes (PFC) & indirectes (Electricité) ; Usage intensif d'électricité ; Sévérité dépendante de l'efficacité des unités d'abattement des PFC
Utilisation de ressources	+++	+++	Usage intensif de matières premières
Stress hydrique	+++	+	Usage intensif d'eau ultra-pure
Acidification	++	+	Beaucoup d'acides ; Sévérité dépendante de l'efficacité des unités de traitement des eaux et de la sensibilité des écosystèmes environnants
Eutrophisation	= / ++	+	Beaucoup d'acides; Sévérité dépendante de l'efficacité des unités de traitement des eaux et de la sensibilité des écosystèmes environnants
Acidification de l'air	+ / ++	=	Quelques gaz acidifiants; La plupart des émissions sont contrôlées par des unités de traitement des émissions dans l'air
Oxydation photochimique	++/++ +	++	Emissions dans l'air dues au fonctionnement des infrastructures ; Sévérité dépendante de l'efficacité des unités de traitement des COV et de la sensibilité des écosystèmes environnants
Santé	+	+	Quelques substances dangereuses à maîtriser pour la sécurité des opérateurs
Déchets	=	+	Quantité considérable de déchets plastiques; taux variable de recyclage
Bruit	=	=	
Amenuisement de la couche d'ozone	=	=	
Toxicité dans l'air	=	=	Quelques gaz toxiques; tous sont sous contrôle après utilisation par des unités de traitement des émissions
Occupation de terres	=	=	
Toxicité dans le sol	=	=	
Odeurs	=	=	

(+ +) Impacts sévères, seulement négatifs

(+) Impacts moyens, négatifs

(=) Pas d'influence ou de faibles impacts positifs / négatifs, c'est à dire la durabilité écologique est maintenue

(-) Impact moyens, positifs

(--) Impacts forts, positifs

1.3 Implications pour le profil d'un composant microélectronique

L'analyse de ces études qualitatives a conforté ma première impression d'une faible connaissance du cycle de vie des produits microélectroniques, même au sein des entreprises, et cette connaissance doit être renforcée. Bien que les entretiens aient confirmé les grandes thématiques, il subsiste une incertitude sur les impacts réels imputables à ces produits. En outre, « l'électronisation » de la société rend difficile la définition d'un « composant moyen ».

Les pressions extérieures se traduisent en un large éventail de préoccupations : le changement climatique, les économies d'énergie, la conservation des ressources, les déchets électroniques et la consommation d'eau. Toutefois, ces aspects consensuels ne sont pas vraiment utiles pour dresser le profil d'un composant. Comme le secteur commence juste à instaurer une pensée « cycle de vie », il n'y a pas de consensus sur la façon de caractériser les impacts de cette activité industrielle.

Cette cartographie des interactions de la microélectronique avec l'environnement nous pousse à conclure sur la nécessité de définir un cadre normatif pour la comparaison des composants. La

définition d'indicateurs pourra répondre aux attentes des parties prenantes car elles seront assurées que le secteur répond par ces actions à des problématiques environnementales pertinentes.

2 Impacts environnementaux des composants microélectroniques

Cette section vise à présenter une liste exhaustive des pressions, en identifiant les flux du cycle de vie d'un composant provoquant des changements sévères sur l'environnement. Pour ce faire, nous considérons les impacts directs et indirects. Les impacts directs sont ceux contrôlés par le fabricant de composants. Les impacts indirects incluent les effets résultant de l'achat, l'utilisation et l'élimination du composant, de la fabrication des matières premières et de la production d'énergie.

2.1 Répartition des impacts sur les phases du cycle de vie

En 2009, des ACV ont été réalisées sur des produits représentatifs de STMicroelectronics:

- un microcontrôleur embarqué dans une voiture ;
- une carte de sécurité gérant l'accès à la télévision ;
- une mémoire dans une console de jeu ;
- un dispositif de gestion de la batterie d'un portable formé de plusieurs composants.

Comme l'illustre la Figure 24, les aspects significatifs sont alternativement liés à la fabrication et l'utilisation pour l'indicateur « réchauffement climatique ». Ces résultats confirment d'autres issus de l'état de l'art récent. Pour [Higgs'09] et [Boyd'10], l'impact prépondérant est lié à l'utilisation. Néanmoins, cela ne peut pas être généralisé à tous les composants. Par exemple, l'entreprise Hynix affirme que 90% de l'impact est causé par la production de la puce³⁴.

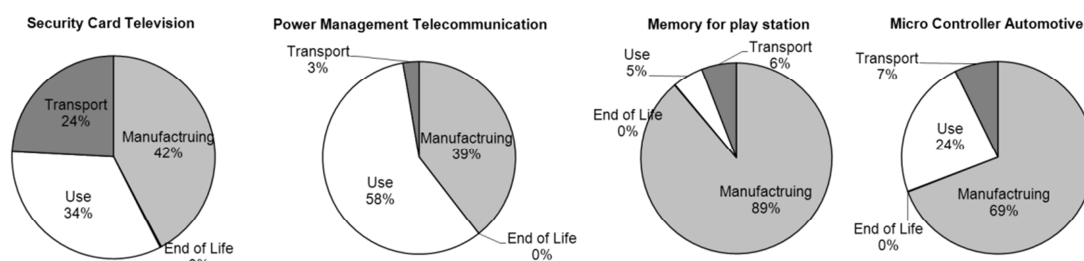


Figure 24 : Emissions carbone (IPPC) pour 4 composants (2009)

2.2 Phase de fabrication

Pour [Schmidt'11], en tenant compte uniquement de la fabrication de la puce, la contribution de la chaîne d'approvisionnement par rapport à l'impact direct de la fabrication varie entre 15% et 98% selon les catégories de dommages d'IMPACT2002+. Pour [Boyd'10], cette même contribution varie de 9% à 28% par catégories de dommages considérées avec la méthode TRACI. Selon notre cas d'étude pour laquelle la phase d'assemblage est prise en compte, les contributions varient de 6 à 58%. En outre, selon [Williams'04], l'ACV d'une puce doit se porter en priorité sur les matières premières secondaires utilisées par les processus plutôt que sur la structure du matériau. Ces

³⁴ Certification coréenne des émissions carbone d'une mémoire SDRAM

http://www.edp.or.kr/carbon/english/list/list_view.asp?page=8&search_colume=&search_text=&idx=106&Gubun=3

résultats nous permettent de conclure sur l'importance de la distinction entre les impacts directs des usines et les impacts indirects dus à la chaîne d'approvisionnement.

- Impacts directs des sites de fabrication : approche top-down

Une approche top-down regarde les impacts des usines comme un tout. Cette approche permet de prendre en compte à la fois les opérations, les infrastructures de la salle blanche et les unités de traitement. Cette approche présente l'intérêt de ne pas être spécifique à une famille de semi-conducteurs et évite des conclusions hâtives issues de l'étude de produits marginaux. L'utilisation de résultats top-down est pertinente car les productions des sites sont homogènes et comparables.

Les systèmes de gestion environnementale mis en place sur les sites nous aident à comprendre les problèmes environnementaux attribuables aux activités industrielles. Dans le cadre de la certification ISO14001, une liste des aspects significatifs liés à l'air, l'eau, le sol et les déchets, est régulièrement dressée en fonction de la gravité, la fréquence, le contrôle et la sensibilité. La liste est présentée dans le Tableau 17 et le Tableau 18 pour les sites front-end et back-end, respectivement.

Tableau 17 : Pressions dans les sites front-end (fabrication de la puce)

LEVIER	PRESSION	ETAT
Liquides contenant des métaux et substances toxiques	Composés toxiques dans les eaux usées	Qualité de l'eau dégradée: toxicité, acidification, modification de la composition, eutrophisation
Acides	Composés à base de chlore, fluor, azote et phosphore dans les eaux usées, changement du pH de l'eau	
Bases	Composés azotés dans les eaux usées, changement du pH de l'eau	
Substances azotées et phosphorées	Composés phosphorés et azotés dans les eaux usées	
Produits contenant du silicium	Composés à base de silice dans les eaux usées	
Substances fluorées	Composés fluorés dans les eaux usées	
Composés organiques	Formation de COV	Qualité de l'eau dégradée Oxydation photochimique
PFC, SF6	Emissions de gaz à effet de serre	Réchauffement climatique
Gaz toxiques et liquides volatils Gaz dopants (SiH ₄ , PH ₃ , BH ₃) Liquides en photolithographie Gravants (NO ₂ , Cl ₂ , BCl ₃)	Composés toxiques dans l'air	Toxicité dans l'air
Solvants / acides	Déchets dangereux ; Emissions de CO	Déchets dangereux Oxydation photochimique
Infrastructures (chaudières, air conditionné)	Emissions de NOX et COV	Qualité de l'eau dégradée Oxydation photochimique
Energie : équipements/infrastructures	Usage intensif d'électricité	Effets indirects dus à la production d'énergie
Eau ultra-pure	Usage intensif d'eau	Stress hydrique accru

Tableau 18 : Pressions dans les sites back-end (encapsulation de la puce dans un boîtier)

LEVIER	PRESSION	ETAT
Métaux	Composés toxiques dans les eaux usées	Qualité de l'eau dégradée
Plastiques	Déchets plastiques	Déchet
Composés organiques	Formation de COV	Qualité de l'eau dégradée Effet d'oxydation photochimique
Energie (équipements et infrastructures)	Usage intensif d'électricité	Effets indirects dus à la production d'énergie

- *Impacts indirects de la chaîne d'approvisionnement : approche hybride*

Les aspects observés à un niveau macroscopique sont maintenant comparés grâce à une approche quantitative utilisant des ACV. Dans cette sous-partie, l'approche hybride présentée précédemment est utilisée pour l'analyse de la chaîne d'approvisionnement compte tenu des résultats de la littérature. On considère les quantités exactes de matières premières utilisées dans le processus de fabrication, à partir d'une simplification de la modélisation de la route de fabrication de la puce.

Dans les principales études publiées d'ACV [Schischke'01] [Williams'02] [Smati'01], les impacts soulignés sont : réchauffement climatique, utilisation d'eau et d'énergie. [Cullen'01] place le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources énergétiques et les émissions de particules parmi les aspects les plus significatifs. De plus, pour [Chang'01], les différents produits chimiques utilisés pendant la fabrication dans des quantités importantes seraient responsables d'effets toxiques pour les écosystèmes et la santé.

Un état de l'art permet de mettre en évidence les éléments les plus néfastes de la chaîne d'approvisionnement (Tableau 19). Notre cas d'étude ajoute la production de gaz rares, utilisés lors de la fabrication (hélium et argon en gravure et de CVD ; xénon en l'implantation ionique).

Tableau 19 : Flux significatifs

LEVIERS : production de...	Sources
Electricité	[Schischke'01] ; [Williams'02] ; [Liu'10] ; [Higgs'09] ; [Andrae'06]
Métaux	[Andrae'06]
Gaz vecteurs	[Chang'01] ; [Higgs'09] ; [Schischke'04]
Produits organiques	[Chang'01]
Eau ultra-pure	[Taiariol'01] ; [Schischke'02]
Produits chimiques ultra-purs	[Higgs'09]
PFC	[Liu'10]
Plaquette silicium vierge	[Higgs'09]
Substrat du boîtier	[Higgs'09]
Gaz rares	Cas d'étude industriel

Les leviers identifiés sont convertis en «états». Cela revient à comprendre comment certains éléments du cycle de vie des composants contribuent à modifier l'état de l'environnement. Un examen par secteur (industrie minière, industrie chimique, producteurs d'électricité) permet de définir les principaux aspects liés à la production de matières premières et énergie utilisées

ultérieurement dans le cycle de vie du composant (Tableau 20). Les impacts relatifs des ressources sont aussi considérés à travers les facteurs de caractérisation des bases de données comme CML, TRACI ou USEtox utilisant la base de données Eco-Invent.

Tableau 20 : Effets des principaux leviers

Production de :..	Effets direct	Sources
Electricité	Effets de l'utilisation et la combustion d'énergies fossiles : -amenuisement des ressources énergétiques -émissions de gaz à effet de serre due à la combustion -émissions de polluants dans l'atmosphère (substances acidifiantes, particules et précurseurs d'ozone) -déversement de pétrole	Agence européenne de l'énergie ³⁵ , [Dincer'99]
Métaux	Amenuisement des ressources, toxicité, acidification	[Salomons'95] [Pizzol'11] [Norgate'07]
Gaz vecteurs (N ₂ , H ₂ , O ₂ ..)	Consommation d'électricité * (procédés cryogéniques énergivores)	[Smith'01]
Produits organiques	Oxydation photochimique, réchauffement climatique	[Bowman'94]
Eau ultra-pure	Eutrophisation (utilisation de nitrate et phosphate) Consommation d'électricité* (purification énergivore)	STMicroelectronics : station de production d'eau ultra-pure
Produits chimiques ultra-purs	Pollution de l'air et l'eau (plusieurs phénomènes mis en jeux)	[Weidenhaupt'97]
	Consommation d'électricité * (purification énergivore)	[Williams'02]
PFC	Réchauffement climatique, toxicité	[Tsai'02]
Plaquette silicium	Consommation d'électricité * (procédés énergivores)	[Duque Ciceri'10]
Substrat du boîtier	Consommation d'électricité * (procédés énergivores)	[Duque Ciceri'10]
Gaz rares	Amenuisement des ressources	CML

*Pour les effets directs, se référer à la première ligne « électricité »

2.3 Intégration dans une application électronique : distribution, utilisation et fin de vie

Les impacts de la phase d'utilisation sont relatifs aux émissions générées par l'électricité consommée dans l'application finale. Nos ACV ont montré que quelque soit le scénario d'élimination, y compris le pires des cas, l'impact de la fin de vie est inférieur à 0,1% de l'impact total et peut donc être négligé (Figure 24). Toutefois, l'élimination du produit est liée à des questions concernant les traitements de fin de vie des métaux lourds : lixiviation des métaux en décharge conduisant à la pollution des sols et rejets de particules métalliques dans l'atmosphère après incinération. Ces effets tendent à être minimisés avec l'application de la directive RoHS.

³⁵ Energy and environment in the European Union Tracking progress towards integration, 2006.
http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_8

En ce qui concerne le transport, les plaquettes sont expédiées des sites front-end aux sites back-end. Selon des feuilles de route sectorielles, le diamètre des plaquettes augmente tandis que la taille des composants diminue, ce qui a tendance à réduire la charge environnementale du transport. Ce phénomène est accentué avec la réduction de la masse et du volume des boîtiers. Ces éléments font que la contribution environnementale de la distribution ne représente qu'une faible part de l'impact total du cycle de vie du produit. Les éléments susmentionnés sont résumés dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Leviers dans la chaîne d'approvisionnement pour les dernières phases du cycle de vie

LEVIERS	PRESSION	ETAT
Consommation d'électricité	Production d'électricité	Impacts liés à la production d'électricité
Déchets électronique	Négligé	Négligé
Transport	Négligé	Négligé

3 Points faibles environnementaux et principaux contributeurs

3.1 Lier les principaux leviers aux impacts les plus significatifs

La section précédente nous a permis d'identifier les leviers pour lesquels l'impact devrait être nécessairement pris en considération. A ce stade, la pertinence de chaque catégorie d'impact est analysée avec soin. D'une part, un effet peut être de plus haute importance qu'un autre, du fait de sa sévérité. D'autre part, la même information peut être considérée à deux reprises ce qui conduit à des difficultés d'interprétation des résultats, sans valeur ajoutée. Le Tableau 22 fait le lien d'une part entre chaque catégorie d'impact et ses principaux contributeurs et d'autre part indique quelles sont les phases que cette catégorie d'impact est susceptible de modifier.

Tableau 22 : Agrégation des impacts générés par une puce sur son cycle de vie

Catégories d'impact	Leviers	CA	F	U
Réchauffement climatique	PFC, électricité	x	x	x
Amenuisement des ressources	Gaz rares, métaux, électricité	x		x
Stress hydrique	Production d'eau ultra-pure	x		
Oxydation photochimique	Composés organiques, solvants, infrastructures, électricité (particules)	x	x	x
Eutrophication	Eau ultra-pure, liquides azotés et phosphorés	x	x	
Toxicité	Métaux, composés toxiques liquides, gaz toxiques	x	x	
Acidification	Produits chimiques et eau ultra-pure, métaux, électricité	x		x
Modification de la composition de l'eau	Liquides: contenant des métaux et substances toxiques, acides, bases, produits à base de silicium, composés fluorés		x	
Déchets dangereux	Solvants / acides		x	
Déchets	Plastiques		x	

* CA : chaîne d'approvisionnement / F : fabrication / U : utilisation

Les premières catégories à prendre en considération sont facilement définissables car elles combinent les observations top-down, bottom-up et les pressions extérieures : réchauffement climatique, épuisement des ressources et stress hydrique.

L'indicateur pour l'« oxydation photochimique » est également pertinent car il est le seul traduisant les effets de la production et de la consommation de solvants et de tous les composés organiques. Il souligne également l'un des principaux effets relatif à la production d'électricité. L'eutrophisation est pertinente, car elle inclut, presque exclusivement, les effets des produits chimiques et de l'eau ultra-pure utilisés dans la fabrication.

Dans un second temps, les catégories «écotoxicité», «acidification» et «modification de la composition de l'eau» ont été mises en évidence pour qualifier les effets sur la qualité de l'eau. Toutes sont liées à la nécessité de contrôler l'utilisation de produits chimiques dangereux.

Les usines n'ont pas d'effet direct sur l'acidification de l'eau. Certes, les fabricants sont de grands consommateurs d'acides dans les processus de nettoyage par voie humide, mais ces acides finissent généralement dans les filières de traitement des eaux usées et sont neutralisés.

Les effets des métaux sont mis en évidence par les trois catégories. Les risques directs de toxicité sont limités pour les travailleurs et les utilisateurs finaux. Le principal risque direct lié aux métaux est leur rejet potentiel dans l'eau ou dans l'air: il est donc préférable de se concentrer sur les effets d'émissions toxiques dans l'eau ou de leurs effets sur l'homme. L'extraction minière intensive apparaît fortement dans les catégories d'impact « épuisement des ressources » ou « extraction de minerais ». Toutefois, certains métaux, principalement le cuivre, ont un effet important d'acidification des milieux environnants l'exploitation minière. Cet aspect peut être également pris en compte dans la catégorie « toxicité », tandis que les effets indirects de produits chimiques liquides (acides et bases) sont considérés par l'«eutrophisation» et la «toxicité».

La composition de l'eau, directement liée à la préservation des écosystèmes, est modifiée par les activités de la microélectronique et probablement par ses fournisseurs. Cependant, les principaux leviers sont pris en compte dans les catégories « eutrophisation » et « toxicité ». Les effets dus aux émissions de silicium et de fluor dans l'eau ne sont pas des problématiques critiques par rapport aux phénomènes de toxicité (contamination des écosystèmes) ou d'eutrophisation.

Enfin, les effets dus à la production de déchets pourraient être envisagés. Toutefois, selon [Ernst'11], un inventaire des quantités de déchets montre que l'industrie microélectronique n'est pas légitime par rapport à d'autres secteurs industriels, d'autant plus que le taux de recyclage des pièces en plastique, relevé comme levier important en back-end, augmente. En outre, les risques liés aux solvants et liquides sont déjà pris en compte par le biais de leur consommation dans la catégorie «oxydation photochimique»: la prise en compte en tant que déchets serait redondant.

En conclusion, les impacts retenus sont : le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources, le stress hydrique, l'oxydation photochimique, l'eutrophisation, la toxicité.

3.2 Sélection d'indicateurs adaptés: quelques suggestions

Pour chacune de ces catégories d'impact, plusieurs indicateurs sont disponibles. Certains ont abouti à un consensus international tandis que d'autres ont des avantages et inconvénients qui méritent discussion. Le panel d'experts du SETAC a listé les « meilleurs » indicateurs, y compris

parmi les modèles les plus avancés. Cependant, tous ces indicateurs ne sont pas encore disponibles dans les logiciels communément utilisés i.e. SimaPro, GaBi ou TEAM. La disponibilité de ces indicateurs n'est donc pas assurée pour un fabricant microélectronique qui a généralement une seule licence de logiciel. Dans cette étude, seuls les indicateurs issus des méthodes disponibles dans ces logiciels sont étudiés (IPCC, CML 2001, Eco-indicator 99, IMPACT 2002+, EDIP97, TRACI 7.0, UseTox et ReCiPe). La sélection d'un modèle n'est pas liée à une adhésion totale.

[Dreyer'03] suggère certains critères pour l'évaluation, qui seront utilisés pour sélectionner les indicateurs. Les méthodes de caractérisation considérées ici garantissent déjà une grande partie de ces critères : l'acceptation par la communauté scientifique, la pertinence, l'interprétation des scores en termes d'impacts ou de dommages, une couverture complète, la faisabilité, la reproductibilité et la transparence. Pour les critères non garantis, chaque indicateur disponible sera examiné indépendamment en utilisant les critères suivants :

1. Incertitude : quantifie la stabilité de l'indicateur par rapport aux données d'entrée de l'inventaire de cycle de vie. Lorsqu'il réalise un ICV, le fabricant de composants est tributaire des bases de données (EcolInvent notamment).

Le coefficient de variabilité (CV) est calculé par une analyse de type Monte Carlo et exprime le rapport entre l'écart type et la valeur moyenne de l'indicateur. L'incertitude indique si l'indicateur est stable. Dans cette étude, nous avons décidé de considérer :

- si le coefficient est supérieur à 15% : l'indicateur est inapproprié ;
- si le coefficient est inférieur à 15% : l'indicateur est fiable ;

2. Vraisemblance : spécifie si les aspects environnementaux mis en avant sont probants. Cela devrait être fait en reliant les aspects environnementaux significatifs relevés grâce à l'identification des leviers et les principaux contributeurs de l'ICV. Il permet d'apprécier le caractère raisonnable des aspects environnementaux du fait des valeurs d'entrée de l'ICV.
3. Orientation : préférer un indicateur mid-point. Pour faciliter l'interprétation de l'indicateur par un non-expert en ACV, seuls les indicateurs mid-point sont considérés parce qu'ils sont plus représentatifs. Si aucun indicateur mid-point ne répond aux deux critères précédents, les indicateurs end-point seront évalués.

Cette section examine les indicateurs disponibles pour chacune des catégories sélectionnées. Les critères mentionnés ci-dessus sont utilisés pour déterminer la pertinence. Les discussions sont basées sur les résultats des ACV sur les 4 produits susmentionnés.

- Utilisation et amenuisement des ressources (minérales et énergétiques)

Les modèles liés à la consommation et l'épuisement des ressources sont différents selon les méthodes de caractérisation. Dans notre cas, cette catégorie doit surligner les effets de :

- l'extraction des minéraux et des combustibles fossiles ;
- l'utilisation de ressources énergétiques et minérales du sol, de l'eau et de l'air ;
- l'utilisation de matériaux rares (des gaz comme le xénon ou hélium ; des métaux comme le palladium ou l'or).

Pour contrôler la consommation d'électricité lors de la fabrication, nous conseillons d'utiliser la consommation locale d'électricité en mégajoules de manière à comparer les performances

énergétiques des usines indépendamment de leur emplacement. Le mix énergétique local, dont le fabricant n'est pas responsable, peut avoir tendance à biaiser l'interprétation ; ce choix est d'autant plus légitime que les impacts du mix énergétique sont déjà pris en compte dans la catégorie « réchauffement climatique ». Cet indicateur renvoie à l'importante question de la maîtrise de la consommation d'électricité lors de la production et permet d'identifier les procédés énergivores.

Les indicateurs disponibles donnent des résultats avec différentes valeurs ajoutées (Tableau 23). L'indicateur EDIP prend en compte la rareté d'une ressource compte tenu des réserves mondiales. L'indicateur CML ajoute la valeur d'une ressource du fait de sa rareté : il intègre son taux d'exploitation actuel pour calculer la disponibilité future d'une ressource. Même si l'indicateur EDIP est adapté, nous recommandons celui de CML, car il ajoute cette notion de taux d'exploitation, importante pour une industrie en expansion.

Tableau 23 : Indicateurs pour l'amenuisement des ressources énergétiques et minérales

Indicateur	Unité	Modèle	Méthode	Contributeurs	Incertitude	Pertinence
Abiotic depletion	kg Sb	[Guinée'95]	CML	Hélium, Charbon, Xénon	7.0%	Oui
Resources	Person.reserves	EDIP 1997	EDIP 1997	Uranium, Etain, Nickel, Charbon	12.1%	Oui

- Consommation d'eau

Le stress hydrique résulte d'un déséquilibre entre l'utilisation de l'eau et les ressources en eau et est à l'origine de la détérioration des ressources en eau douce en termes de quantité (surexploitation aquifère, rivières asséchées, etc.) et de la qualité (eutrophisation, pollution par la matière organique, intrusion d'eau salée, etc.). La consommation d'eau induit des impacts moins importants dans les zones tempérées que dans les zones à climat aride où l'eau devient rare et les moyens disponibles pour l'exploitation et l'approvisionnement aux populations ne sont pas équivalents à ceux auxquels on a recours dans les parties du monde dites développées. L'indicateur de stress hydrique mesure la proportion de prélèvements d'eau par rapport aux ressources renouvelables [Alcamo'00]. Il s'agit d'un ratio de criticité ce qui implique que le stress hydrique dépend de la variabilité des ressources. Toutefois, aucun indicateur sur le stress hydrique en termes d'impacts n'a encore été intégré dans les outils d'ACV. Par conséquent, le seul indicateur raisonnable aujourd'hui est le volume des importations d'eau brute. L'eau ultra-pure est prise en compte puisque l'eau brute est transformée par les centrales d'eau ultra-pure situées dans les usines.

- Réchauffement climatique

Le modèle de caractérisation tel qu'il a été développé par l'Intergovernmental Panel on Climate Change [Albritton'95] est utilisé par toutes les méthodes communes et bénéficie d'un consensus international. Cet indicateur est adapté pour notre profil car il caractérise à la fois les causes directes et indirectes des émissions de gaz à effet de serre (Tableau 24).

Tableau 24 : Indicateurs pour le réchauffement climatique

Indicateur	Unité	Modèle	Méthode	Contributeurs	Incertitude
Global Warming	kg CO ₂	IPCC 2007 100 ans	CML2, Eco-indicator 99, IMPACT2002+, EDIP2003	CO ₂ , SF ₆	De 9.0 à 9.1%

- Eutrophisation aquatique

Le modèle d'eutrophisation de EDIP2003 [Hauschild'05] étudie de façon indépendante les effets dus à l'azote et ceux dus au phosphore. Dans le cas de la microélectronique, ces deux éléments sont largement utilisés: il est souhaitable d'envisager une combinaison des deux aspects. Le modèle de CML (disponible également dans IMPACT2002+) couvre l'eutrophisation terrestre et aquatique. Le modèle développé dans TRACI dispose d'un modèle de différenciation spatiale ce qui n'est pas le cas de CML. Cependant, les résultats obtenus par les deux méthodes sont similaires (Tableau 25).

Tableau 25 : Indicateurs mid-points pour l'eutrophisation

Indicateur	Unité	Modèle	Méthode	Contributeurs	Incertitude	Pertinence
Eutrophication	kg PO4	[Guinée'02]	CML, IMPACT 2002+	PO ₄ ³⁻ , NOx in air	De 8.69%, à 10.7%	Oui
Eutrophication	Kg N	[Guinée'02] [Norris'03]	TRACI	PO ₄ ³⁻ , NOx in air, NO ₃ ⁻	10.2%	Oui

- Ecotoxicité dans l'eau

La toxicité peut être à l'origine d'impacts sur les écosystèmes ou sur la santé humaine. Nous conseillons d'utiliser l'indicateur relatif à la santé. En effet il existe un problème dans l'industrie électronique sur l'évaluation des risques des produits chimiques.

Tableau 26 : Indicateurs mid-points pour l'écotoxicité aquatique

Indicateur	Unité	Modèle	Méthode	Contributeur	Incertitude	Pertinence
Human toxicity non-cancer	CTUh	UseToxTM	Use Tox	CS ₂ , CCl ₄ ,	14.2%	Oui
Ecotoxicity	CTUe	UseToxTM	Use Tox	C ₉ H ₁₂ , C ₆ H ₆ O	15.3%	Oui
Aquatic eco-toxicity	kg TEG	IMPACT 2002+ Chemical toxicity	IMPACT 2002+	Al, Cu	17.9%	Oui
Fresh water eco-toxicity	kg 1,4-DB	USES-LCA	CML	V, Be	44.4%	Non
Marine water eco-toxicity	kg 1,4-DB	USES-LCA	CML	V, Be	54%	Non
Water eco-toxicity chronic	m3	EDIP1997	EDIP	Al, Sr, Se	34.4%	Non
Eco-toxicity	kg 2,4-D	CalTOX 4.0	TRACI	Al	38.1%	Non

Cette catégorie est actuellement en cours de développement. Les modèles sont complexes et conduisent à une incertitude élevée car s'appuient sur de nombreuses hypothèses [Pizzol'11]. Pour une substance émise dans l'eau, la chaîne de causalité considère la destination de la substance dans l'environnement, l'exposition des espèces et la réponse toxicologique avec la probabilité d'effets et de leur gravité. Ce modèle de chaîne étendue, pour l'eau douce et plus encore pour la pollution marine, conduit à une forte incertitude : pour les indicateurs de CML, TRACI et EDIP, l'incertitude est trop élevée et les rend inappropriés (Tableau 26). Le meilleur modèle disponible est celui proposé par UseTox, ce qui rejoint les conclusions des experts en ACV [Rosenbaum'08].

- Oxydation Photochimique

Les modèles décrivant ce phénomène s'appuient sur les effets sur la santé des émissions atmosphériques : c'est pourquoi cet indicateur est souvent appelé « respiratory effects for organics ». L'impact sur la qualité des écosystèmes n'a pas encore été modélisé. En raison de l'incertitude, seul l'indicateur du modèle britannique AEA est fiable dans notre cas (Tableau 27). Selon des discussions de l'ILCD, ces indicateurs seraient obsolètes car ils ne tiennent pas compte de la localisation géographique (zones à basse ou haute densité de population) et que le calcul de facteurs de caractérisation du modèle n'est pas satisfaisante, le modèle étant limité et incomplet.

Tableau 27 : Indicateurs mid-points pour oxydation photochimique

Indicateur	Unité	Modèle	Méthode	Contributeur	Incertitude	Pertinence
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	UK AEA	CML EDIP97 IMPACT2002+	SO ₂	De 13. à 13.7%	Oui
Smog	Kg NO _x	MIR	TRACI	NO _x	15.2%	Non
Ozone formation	Person. ppm.h	RAINS, EMEP	EDIP2003	NO _x , CH ₄ fossil	15.5%	Non

4 Localisation des impacts

Dans les remarques précédemment formulées, nous avons plusieurs fois évoqué l'importance du site de fabrication. Le fait de fabriquer un produit dans une usine plutôt que dans une autre conduit à des différences de performance environnementale, même dans le cas de procédés de fabrication rigoureusement identiques. Ces différences s'expliquent par :

- la génération de la salle blanche ; les usines fabriquant des technologies avancées, c'est-à-dire dont le nœud technologique est petit, possèdent des infrastructures de pointe pour conserver un faible niveau de contamination particulière par unité de surface.
- la performance des infrastructures de traitement des émissions : rendement, espèces traitées ;
- la gestion de l'environnement sur le site : gestion des déchets, économies d'énergie, recyclage de l'eau, etc.
- la proximité géographique des aéroports, des ports et autres centres de distribution pour les matières premières puis l'expédition des produits finis ;

Pour inclure les spécificités des sites, un profil est dressé, localisant les impacts dans le temps et l'espace. Pour le secteur agricole, [Lutz'08] écrit qu'une série d'indicateurs liée à la situation locale est utile pour « la surveillance et l'évaluation des procédures » et pour la création d'une politique locale. [Blanc'10] décrit les paramètres de localisation temporelle et géographique des impacts :

- environnemental: ressources énergétiques fossiles ou renouvelables, zone urbaine ou rurale, écosystèmes environnants, disponibilité des ressources ;
- social: population, densité, revenus ;
- économique : le développement, importation / exportation, PIB ;
- institutionnel: accès à la réglementation en vigueur.

Le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources (excepté la ressource en eau) sont des effets planétaires. Au contraire, il existe d'autres phénomènes dont l'impact est localisé (Tableau

28). Dans ce cas, les spécificités des lieux de production doivent être examinées avant la caractérisation de la fabrication.

Tableau 28 : Exemples de l'influence de la localisation d'un site sur la gravité d'un impact

Impacts	Influence de la localisation géographique du site
Emissions dans l'eau : eutrophisation et écotoxicité aquatique	L'émission de certaines substances, comme les métaux lourds, déséquilibre les écosystèmes et crée des impacts sur la biodiversité en raison de problèmes de bioaccumulation dans les micro-organismes locaux. Ces mécanismes sont amplifiés lorsque le milieu récepteur est sensible (zone protégée) et lorsque les émissions ne sont pas diluées (cours d'eau).
Consommation de ressources en eau	L'eau est une ressource inégalement répartie dans l'espace et dans le temps à la surface de la Terre. La consommation d'eau par l'industrie a tendance à faire augmenter le stress hydrique de la région.
Oxydation photochimique	Les zones urbaines ou péri-urbaines sont plus sensibles que les zones rurales, parce que déjà soumises à des pollutions anthropiques.

De nombreux travaux sur la différenciation spatiale ont été menés au cours de 15 dernières années [Potting'98] [Krewitt'01] [Seppälä'00] [Norris'02] [Hettelingh'05]. Ces travaux montrent la pertinence des modèles intégrant la différenciation spatiale dans les facteurs de caractérisation. Selon [Potting'06], il existe plusieurs types de différenciation spatiale des impacts :

- *site-generic* : aucune différenciation ; les sources contribuent au même environnement récepteur ;
- *site-dependent* : la différenciation spatiale est partielle ; on distingue les classes de sources en fonction de l'environnement récepteur. Ces classes sont définies à l'échelle de pays ou de régions. Les facteurs de caractérisation incluent les variations dans et entre les environnements pour chaque source.
- *site-specific* : la différenciation spatiale est très détaillée. Les impacts sont calculés précisément à partir de la localisation de la source. Cette modélisation nécessite la connaissance des écosystèmes locaux soumis aux différentes sources.

[Bellekom'06] montre que la différenciation spatiale au niveau d'un site, « *site-specific* » n'est pas réaliste au contraire d'une modélisation « *site-dependant* » plus facile à mettre en œuvre. De plus, cette modélisation est suffisante lorsqu'on considère des impacts relatifs à des émissions atmosphériques du fait de la dispersion des particules.

Pour une entreprise dont les sites sont situés à travers le monde, il est nécessaire d'avoir une cohérence dans la détermination des impacts du fait du choix de la localisation des impacts sur le site. Ainsi, l'effet environnemental de la situation des sites est pris en compte indirectement par les entreprises : les politiques locales et les réglementations les obligent à respecter des seuils de concentration pour les rejets dans l'air et l'eau. Dans les régions où la disponibilité en eau est faible, son prix est important ce qui représente une limitation. Cette localisation est un élément moteur de la stratégie, notamment dans la politique d'investissement sur les infrastructures adaptées à la situation géographique du site (station de traitement des eaux, brûleur de COV, recyclage de l'eau).

[Potting'06] déplore la non-intégration dans les outils d'ACV des modèles de caractérisation permettant l'inclusion des spécificités des sites dans le calcul des impacts. Ceci serait dû au manque d'intérêt de la part des utilisateurs d'ACV. Par ce paragraphe, nous réaffirmons la nécessité d'intégrer ces modèles dans les outils d'ACV communément utilisés dans l'industrie afin de prendre en compte les spécificités des sites de production.

5 Résumé et conclusion du chapitre 7

Le Tableau 29 résume les éléments significatifs qui ont guidé la réflexion jusqu'au choix final de l'ensemble d'indicateurs environnementaux, approprié pour dresser le profil d'une puce.

Tableau 29 : Indicateur retenus pour caractériser les impacts environnementaux d'un composant

Indicateurs	Pertinence
Réchauffement climatique	C'est l'indicateur le plus couramment utilisé pour rendre compte des changements environnementaux. Dans l'industrie microélectronique, cet indicateur est d'autant plus pertinent qu'une grande quantité d'électricité est consommée pendant le cycle de vie complet, par les processus de production de matières premières très énergivores, et l'utilisation du produit final dans son application. En outre, une quantité considérable de PFC est consommée lors de la fabrication.
Amenuisement des ressources	La fabrication de puces consomme des ressources énergétiques et minérales. Les gaz rares et métaux précieux doivent être également mentionnés. Il s'agit d'un sujet crucial pour l'industrie électronique.
Eutrophisation aquatique	La qualité de l'eau entourant les usines microélectroniques est en grande partie altérée par l'utilisation intensive d'acides azotés et phosphorés, en particulier dans les processus de nettoyage par voie humide.
Volume d'eau importé pour la fabrication	Le stress sur l'eau est principalement dû à l'eau ultra-pure utilisée pour la production et le fonctionnement général de l'usine. Les fabricants sont de plus en plus contrôlés sur la maîtrise de l'eau.
Toxicité pour l'homme	La fabrication, en particulier pour le boîtier, rejette de nombreux métaux, sous différentes formes physiques (particules et solides). Ces rejets dans l'eau induisent des toxiques. Cet indicateur permet d'observer l'effet bénéfique dû à la législation RoHS. D'autres liquides particuliers (résines, solvants, produits issus du silicium, bases et acides) doivent être contrôlés concernant d'éventuels effets toxiques au moment de leur fabrication et leur utilisation dans les usines.
Oxydation photochimique	Plusieurs étapes de la fabrication consomment des solvants qui produisent des COV. Les infrastructures dégradent également la qualité de l'air (chaudières, réfrigération de l'air). Cet indicateur caractérise ces pollutions.
Consommation d'électricité pendant la fabrication	Cet indicateur est le plus approprié pour prendre en compte l'énergie totale consommée par les équipements et les installations pendant la fabrication. Il aide à identifier les points faibles.

La sélection d'un ensemble d'indicateurs approprié contribue à accroître les connaissances sur le cycle de vie des composants. Un indicateur approprié doit être accepté par la communauté scientifique internationale, être stable et aider à dresser des conclusions raisonnables et constructives sur les principaux contributeurs. Notre sélection est faite selon l'état de l'art, mais on peut s'attendre à voir émerger de nouvelles méthodes et indicateurs dans les logiciels d'ACV, comme le stress hydrique ou la biodiversité. Nous recommandons vivement l'élaboration d'indicateurs standards conduisant à un consensus, tel que « IPCC » pour réchauffement climatique.

Chapitre 8 : Caractérisation environnementale d'un composant microélectronique

Les impacts environnementaux générés par un produit sont décrits sur plusieurs indicateurs d'impacts, caractérisant les spécificités environnementales d'un produit sur son cycle de vie. L'impact environnemental d'un produit se calcule comme suit :

Pour i allant de 1 à 7, où i représente un des sept indicateurs d'impacts présélectionnés

$$IE_{Ci}(\text{Produit}) = IE_{Ci}(\text{Puce}) + IE_{Ci}(\text{Boitier}) + IE_{Ci}(D) + IE_{Ci}(U) + IE_{Ci}(FdV)$$

Avec

- $IE_{Ci}(\text{Produit})$: impact d'un produit sur la catégorie d'impact Ci
- $IE_{Ci}(\text{Puce})$: impact de la fabrication de la puce sur la catégorie d'impact Ci
- $IE_{Ci}(\text{Boitier})$: impact de l'encapsulation du composant sur la catégorie d'impact Ci
- $IE_{Ci}(D)$: impact de la distribution du circuit IC sur la catégorie d'impact Ci
- $IE_{Ci}(U)$: impact de l'utilisation du circuit IC sur la catégorie d'impact Ci
- $IE_{Ci}(FdV)$: impact de la fin de vie du circuit IC sur la catégorie d'impact Ci

Chaque phase a des effets plus ou moins importants sur les sept indicateurs d'impacts. Les impacts des entités (matériau, procédé, modules, puce, boitier et phase du cycle de vie) peuvent être alors caractérisés par au moins un de ces indicateurs d'impact. La Figure 25 montre que différents jeux d'indicateurs seront manipulés pour décrire l'empreinte environnementale des sous-ensembles du produit et notamment ceux de la fabrication. La mesure des performances environnementales d'une entité quelconque est une quantification de l'impact absolu sur les impacts auxquels elle contribue.

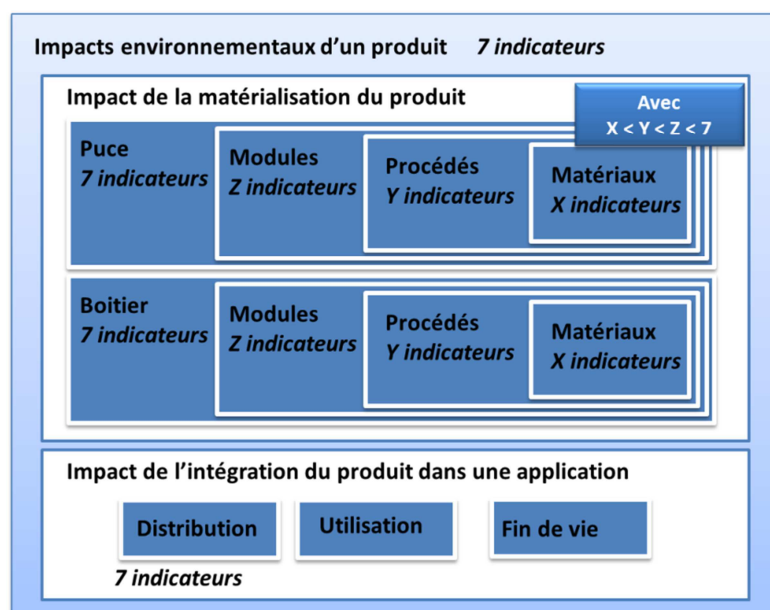


Figure 25 : Segmentation du produit microélectronique sur son cycle et jeux d'indicateurs

Si l'évaluation environnementale des phases d'intégration du produit dans l'application ne présente pas de problème majeur, la caractérisation de la fabrication d'un circuit, et de ses sous-systèmes, est liée à certaines difficultés. Par la suite, nous verrons comment caractériser des matériaux, des procédés, des modules et enfin la fabrication et l'encapsulation d'une puce.

1 Caractérisation environnementale des matériaux utilisés pendant la fabrication

Les impacts de la fabrication du composant sont décrits sur 5 indicateurs, précédemment sélectionnés et sur 2 indicateurs de flux : les impacts de l'approvisionnement en matières premières sont donc considérés sur 5 indicateurs. Les matériaux utilisés doivent tendre à ne pas aggraver ces effets du fait de leur fabrication, de leur utilisation sur le site, de leur traitement après utilisation et des émissions correspondantes générées.

Afin de répondre à ce problème, nous considérerons les matériaux selon leur fonction et leur utilisation dans la fabrication et les classerons en grandes familles. Pour chacune de ces familles, on veillera à définir quels sont les aspects sur lesquels elles contribuent le plus. Ensuite, une méthode de tri et de classification de la performance environnementale sera proposée.

Tableau 30 : Familles de matériaux

Matériaux	Unité fonctionnelle	Ateliers
Electricité	Alimentation des équipements de production Changer les conditions physiques ³⁶ de la réaction	Tous
Solvant	Définir des motifs sur le silicium Nettoyer	Photolithographie Tous
Slurry	Polissage chimique	CMP
Liquide corrosif et /ou toxique	Nettoyer, décontaminer ou graver	Bains chimiques, Gravure humide
Gaz neutres	Lavage, ambiance (vide, vecteurs)	Tous
Gaz non neutre	Traitement du silicium	Gravure, CVD, Diffusion
Gaz dopant	Dopage du silicium	Implantation ionique
Eau ultra-pure	nettoyer	Tous
Substrat en silicium	x	x
Colle	Coller la puce au substrat	Collage
Résine underfill	Faciliter l'adhésion de la puce au substrat sur une technologie flip chip	Flip chip
Résine de moulage	Encapsuler et protéger la puce	Moulage
Flux	Souder les billes	Flip chip
Pâte à braser	Souder les billes	Ball attach
Tape	Maintenir la plaquette	Sciage, Polissage
Métal : fil, billes, revêtement, cible	Assurer la connectivité de la puce avec le boîtier	Câblage filaire, Ball attach, PVD
Substrats silicium et PCB	x	x

³⁶ L'électricité permet d'alimenter les pompes à vide pour changer les conditions de pression, de chauffer les résistances pour monter la température dans un four, de fournir un rayonnement RF en alimentant un générateur, etc.

Une famille est déterminée en fonction de la composition chimique des matériaux ainsi que de l'atelier dans lesquels ils sont utilisés et de leurs fonctions. Chaque matériau utilisé a un rôle précis pour la mise en œuvre du procédé. Cela peut être un ajout de matière, catalyser une réaction, etc. On comparera des matériaux remplissant la même fonction. Les familles de matériaux que nous avons identifiées sont résumées dans le Tableau 30.

Comme précisé dans la section 2.4 du chapitre 6, la charge environnementale d'un matériau est associée à son impact en amont, son utilisation dans le contexte de production et son impact en aval (par son traitement, y compris des coproduits, et rejets dans les milieux environnants). Ces risques sont évalués de manière qualitative en estimant l'utilisation typique d'un matériau et les impacts associés. Cette estimation est réalisée grâce aux documents préparés pour la certification ISO14001 sur les aspects environnementaux significatifs (AES) et des travaux de déclaration en réponse au règlement REACH. Un AES est un « élément des activités, produits ou services d'un organisme qui a ou qui peut avoir des effets non négligeables sur l'environnement ». Chacun des aspects identifiés est évalué en fonction de 4 critères : la fréquence d'apparition, la gravité de l'impact, la maîtrise de l'impact et la sensibilité du milieu récepteur (l'environnement naturel et humain).

Par exemple, dans le cas de l'utilisation de cibles de métal en PVD (dépôt de métal en phase vapeur), le risque de contamination particulaire métallique des écosystèmes aquatiques environnants lors du lavage des parois de l'équipement est important. Lorsque deux métaux de cible sont comparés, l'impact sur l'environnement dû à la présence de ces métaux dans l'eau est comparé. Cependant, la quantité et la concentration des particules métalliques dans l'eau dépendent de la technique de nettoyage et de traitement des déchets aqueux du site. On retient donc qu'il est important de considérer l'impact d'une cible sur l'aspect « écotoxicité de l'eau ».

Ce même travail est réalisé pour l'ensemble des familles et permet de définir les catégories d'impact sur lesquelles chaque famille de matériaux a une incidence particulière.

Tableau 31 : Catégories d'impacts par famille de matériaux

Famille de matériaux	Ressources	Eutrophisation	Ecotoxicité	Oxydation	Effet de serre
Electricité	x			x	x
Solvant				x	
Slurry		x	x		
Liquide corrosif / toxique		x	x		
Gaz neutre	x				x
Gaz non neutre		x	x		x
Gaz dopant			x		
Eau ultra-pure		x			
Substrat en silicium					x
Colle			x		x
Résine-underfill			x		x
Résine de moulage					x
Flux			x		x
Pâte à braser			x		x
Tape					x
Metal*	x		x		
Substrats silicium et PCB	x				x

Le Tableau 31 résume les catégories d'impact choisies pour chaque famille de matériaux : sont sélectionnés un ou deux indicateurs, selon les propriétés chimiques de ces matériaux. Pour les espèces comme les gaz neutres ou les plaquettes vierges de silicium, le réchauffement climatique est retenu comme l'indicateur environnemental de base : il permet de prendre en compte l'énergie consommée pour le produire.

On pourra trier les matériaux appartenant à une même famille en fonction de critères environnementaux à partir de ces indicateurs et ainsi donner à chaque matériau une classe : rouge pour les matériaux les plus polluants (à éviter), verte pour les moins polluantes (à choisir en priorité), et blanche pour les matériaux intermédiaires.

Certaines familles ne concernent qu'une seule catégorie d'impact : la classification est simple.

Certaines familles agissent sur deux ou trois catégories, qui ont a priori respectivement la même importance. On ne cherchera donc pas à normaliser les résultats mais plutôt à intégrer une méthode de décision numérique. Pour [Ben Mena'00], « les méthodes d'analyse multicritère ou, plus exactement, les méthodes d'aide multicritères à la décision sont des techniques assez récentes et en plein développement. Par leur manière d'intégrer tout type de critères, ces procédures semblent mieux permettre de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet ». Un problème de conception, et donc ici le choix d'un matériau, n'est en effet pas un problème qui nécessite un optimum mais qui tend plutôt à suggérer des solutions acceptables et éviter celles dont les impacts environnementaux sont trop importants. Nous proposons une méthode de tri très simplifiée permettant de discriminer des matériaux entre eux selon plusieurs critères environnementaux. Les matériaux sont triés au sein d'une même famille car il s'agit de proposer des options de substitution aux ingénieurs. Pour chaque indicateur de catégories d'impact, les items sont triés afin d'obtenir trois classes de taille homogène :

- trier par ordre décroissant
- le maximum prendra la valeur 10
- le minimum prendra la valeur 0
- les items sont réévalués en fonction de la nouvelle échelle de 0 à 10
- un item dont la valeur est supérieure à 8 est « mauvais »
- un item dont la valeur est inférieure à 3 est « correct »

Ensuite, on agrège les n catégories d'impacts:

- si strictement plus de $n/2$ indicateurs sont « mauvais », l'item est « rouge »
- si strictement plus de $n/2$ indicateurs sont « corrects », l'item est « verte »
- si $n/2$ indicateurs sont « mauvais » et au moins un indicateur est non-classé, l'item est « rouge »
- si $n/2$ indicateurs sont « corrects » et au moins un indicateur est non-classé, l'item est « vert »
- dans tous les autres cas, l'item est en classe blanche

D'autre part, pour chaque matériau, doivent être signalés ceux qui sont dans le viseur des contraintes réglementaires. Quatre niveaux de préoccupation sont définis :

- niveau 1: contient des substances interdites ;
- niveau2: contient des substances dont l'interdiction est imminente ;

- niveau 3: contient des substances dont le risque d'interdiction d'ici 5 ans est fort;
- niveau 4: signale tous métaux dits de conflit.

Cette caractérisation simplifiée permet de poser un jugement de valeur sur les performances environnementales de matériaux et de mettre en exergue ceux qui sont polluants et devraient être retirés peu à peu de la fabrication ou mettre en avant au contraire les matériaux dont l'impact est faible du fait de sa fabrication ou du traitement environnemental approprié sur le site de production microélectronique.

2 Caractérisation environnementale des procédés de fabrication

Chaque atelier de fabrication a des impacts environnementaux qui lui sont propres puisqu'il regroupe des procédés de fabrication dont la fonction et les propriétés sont différentes. On cherche à déterminer un cadre commun à l'atelier, c'est-à-dire la configuration la plus commune pour les procédés de l'atelier. Ainsi, les matières premières utilisées le plus fréquemment sont énumérées : gaz, produits chimiques, solides, électricité, eau.

Les équipements sont caractérisés ainsi que les conditions de fonctionnement normal du procédé : température, pression, temps... Cet inventaire est réalisé selon la méthode décrite ci-dessous :

- inventorier les consommations de l'atelier sur une année ;
- négliger les consommations représentant moins de 1% du volume, moins de 1% de l'énergie et qui sont non toxiques. Aucun matériau présentant des phrases de risque n'est négligé ;
- étudier les déchets liquides, solides ou gazeux générés par le procédé. Pour cela il faut connaître l'état actuel des usines de la société et les moyens de traitement et d'abattement des émissions, existants sur les sites ou non. Cette étape est réalisée de manière qualitative. En effet, la nature et la quantité de déchets formés est largement dépendante des consommations en entrée du procédé.

Une fois le cadre défini, les indicateurs sur lesquels les procédés de fabrication ont une influence significative sont déterminés par la méthode suivante :

- attribuer les aspects environnementaux aux matériaux les plus utilisés puis évaluer qualitativement l'efficacité de leur traitement sur l'atelier ;
- estimer quels sont les ateliers utilisant le plus d'eau et ceux qui sont les plus énergivores, c'est-à-dire ceux dont les équipements sont puissants et dont les temps de cycle des recettes sont longs.

Les résultats sont résumés dans le Tableau 32. L'empreinte environnementale des procédés est donc évaluée selon plusieurs critères.

Tableau 32 : Aspects significatifs des procédés

Procédés	Ressources	Eutrophisation	Eco-toxicité	Oxydation	Effet de serre	Eau	Electricité
Diffusion					x		x
Gravure	x		x		x		x
PVD	x		x		x		x
Electro-déposition	x		x				x
CVD	x		x		x		x
Implant	x		x				x
Nettoyage		x	x	x		x	
Photo-lithographie				x	x		x
CMP			x	x	x	x	
Câblage filaire	x		x				x
Collage			x		x		x
Balls attach	x		x				x
Underfill			x		x		x
Flip chip			x		x		x
Traitement plaquette					x	x	
Moulage					x		x

Afin de comparer deux étapes de procédés entre elles notamment lorsqu'une étape est modifiée, une méthode de décision multicritère doit permettre de décider du statut environnemental du changement de recette. Pour les procédés, il y a au plus quatre critères (appelés $C1$, $C2$, $C3$, $C4$). Les critères sont quantifiés lors de l'étape de caractérisation où sont obtenus les scores d'impacts environnementaux sur les différents critères $IE_{Ci}(X)$. La méthode décrite ci-dessous est utilisée pour discriminer deux procédés X et Y évalués sur n critères.

1. Evaluer l'écart entre les deux systèmes sur chaque critère

$$D(X/Y, Ci) = 100 \left[1 - \frac{IE_{Ci}(Y)}{IE_{Ci}(X)} \right]$$

2. Calculer la déviation entre X et Y, $D(X/Y)$, en ajoutant les écarts sur chaque critère :

$$D(X/Y) = \sum_{i=1}^n D(X/Y, Ci)$$

Tableau 33 : Statut environnemental en fonction de la déviation

Case	Valeur de la déviation	Statut environnemental
1	$D(X/Y) > 10\%$	Y est mieux que X
2	$D(X/Y) < -10\%$	X est mieux que Y
3	$0\% < D(X/Y) < 10\%$ et $\forall i (D(X/Y; C_i) > 0)$	Y est mieux que X
4	$-10\% < D(X/Y) < 0\%$ et $\forall i (D(X/Y; C_i) < 0)$	X est mieux que Y
5	$ D(X/Y) < 1\%$ et $\exists i, j (D(X/Y; C_i) * D(X/Y; C_j) < 0)$	Aucune discrimination faite entre X et Y

Cette caractérisation simplifiée des procédés de fabrication permet de mesurer l'évolution des performances environnementales lors de changement de recette en R&D ou en production. Nous

pourrons ainsi étudier l'effet environnemental des changements de nœud technologique au niveau des procédés élémentaires ainsi que de l'introduction en nouvelles substances. Cette méthode est valable pour un procédé ou un ensemble limité de procédés, c'est à dire un module constitué d'environ une dizaine d'étapes élémentaires.

3 Caractérisation environnementale de la phase de fabrication d'un composant

Dans cette partie, notre objectif est de montrer comment formaliser l'évaluation des performances environnementales de la fabrication de composants. Comme représentée dans la Figure 26, la méthodologie que nous proposons se décompose en trois étapes : caractérisation incluant la localisation des sites de production, normalisation et pondération. Le terme « technologie » désigne indifféremment la technologie de fabrication de la puce sur la plaquette ou la technique d'assemblage du boîtier.

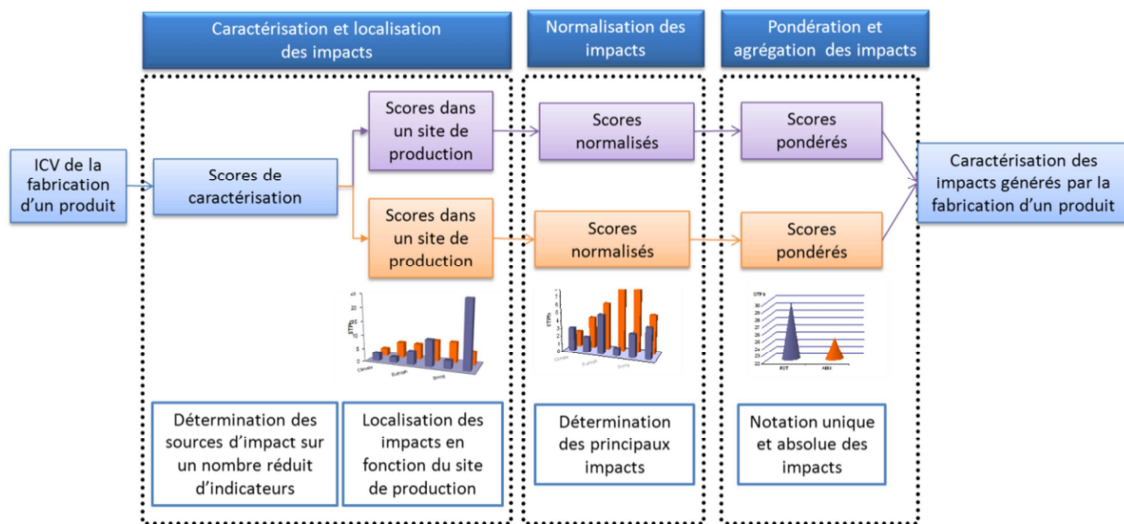


Figure 26 : Méthode de caractérisation des technologies de fabrication

3.1 Cahier des charges pour une méthode de caractérisation des technologies de fabrication

L'analyse environnementale réalisée à l'aide d'une ACV quantifie les impacts générés par un produit et désigne les principales contributions à des impacts ou des flux. Pour cette étape, nous suggérons la démarche suivante :

1. Utiliser la méthode dans le chapitre 6 pour l'inventaire du cycle de vie ;
2. Localiser les impacts en fonction des spécificités du site de fabrication si possible ;
3. Modéliser l'inventaire dans un logiciel d'ACV spécialisé (GaBi, SimaPro, TEAM) ;
4. Restreindre le nombre d'indicateurs et sélectionner les méthodes de caractérisation telles que décrites dans les sections précédentes.

A ce stade, les impacts environnementaux générés par la fabrication d'un produit ont été déterminés. L'analyse des résultats de l'ACV permet de qualifier et de quantifier les impacts générés par le produit microélectronique mais pour comparer des technologies de fabrication sur des critères environnementaux, le problème qui se pose est de mettre au point une méthode de

caractérisation adaptée et robuste. Uniquement à partir des scores de caractérisation, il est difficile de décider quel produit est respectueux de l'environnement et quel impact est particulièrement important. La méthode doit fournir un moyen de calculer les impacts de la fabrication d'une puce dans son ensemble (ou à des niveaux d'abstraction inférieurs : ensemble d'opérations comme les blocs) et de définir les principales sources de pollution. L'objectif est de déterminer les impacts de la fabrication d'un produit et la manière de les réduire.

Les attentes d'un fabricant de produits microélectroniques vis-à-vis d'une méthode de caractérisation intégrant des étapes de normalisation, regroupement et pondération sont :

- de disposer d'un système de notation pour évaluer les performances des technologies ;
- de trouver aisément les points faibles des technologies parmi les nombreux sous-systèmes ;
- de disposer d'un outil pour comparer les performances des sites de fabrication.

- Normalisation : prérequis

La normalisation doit être stable à la fois géographiquement et temporellement afin de permettre de comparer des produits indifféremment fabriqués sur plusieurs sites de production et d'étudier les bénéfices/pertes environnementaux d'une génération à l'autre et ce pour l'ensemble des produits de l'entreprise ou du secteur d'activités. Dans les méthodes comme IMPACT2002+ ou EcoIndicator 99 [Goedkoop'00], les catégories de dommages (et non pas les catégories d'impact) sont normalisées au niveau européen. Ces méthodes utilisent un équivalent habitant, qui est la mesure des effets sur l'environnement qu'un habitant moyen européen cause en un an, sur une année de référence. Les effets sont comparés à l'échelle de cet équivalent-habitant. L'unité correspondante est appelée « Eco-point ». L'utilisation de cette unité, disponible dans les outils d'ACV, n'est pas appropriée pour le secteur de la microélectronique pour deux raisons :

- Alors que le choix d'une zone de référence comme l'Europe entraîne naturellement des distorsions dans l'évaluation des impacts, l'implantation multinationale des usines de production exclut le choix d'une zone précise pour la comptabilisation des impacts. C'est d'autant plus vrai que cette industrie utilise des produits chimiques très spécifiques fabriqués seulement dans quelques usines dans le monde ; l'approvisionnement d'un fabricant est irrémédiablement international.
- Du fait de ses nombreuses spécificités et en particulier du fait des techniques de fabrication extrêmement consommatrices de ressources (électricité, eau, produit chimiques), l'industrie microélectronique a des impacts environnementaux, certes importants, mais qui lui sont propres et font partie de son « ADN ». On peut citer l'utilisation du silicium, de l'eau et des produits chimiques ultra-purs, les PFC pour la gravure de l'oxyde de silicium. Ces consommations et leurs impacts associés sont particuliers à la microélectronique et ne seront pas supprimés à moins de changement de trajectoire complet (semi-conducteur sur substrat organique), ce qui est peu probant.

Les jeux de normalisation des méthodes traditionnelles mettent en avant systématiquement les mêmes effets quelle que soit la technologie de boîtier ou de puce et même au niveau du composant et ce de façon écrasante. Par exemple, la normalisation de CML souligne les catégories d'impacts « Abiotic depletion » et « Marine Eco-toxicity » qui représentent environ 80% de l'impact total normalisé tandis que Eco-Indicator c'est « Minerals » et « Climate Change » et « Respiratory

Inorganics » (95% des effets normalisés). Les mêmes effets sont surlignés systématiquement ce qui ne permet ni d'accéder à des informations plus microscopiques ni de discriminer les impacts de deux technologies différentes.

La normalisation n'a pas pour but de stigmatiser les activités d'un fabricant de composants microélectroniques mais plutôt de l'aider à maîtriser ses impacts dans la mesure du possible en mettant l'accent sur les effets « anormaux » ou « disproportionnés » en regard de ce secteur d'activité, de ses produits et des pratiques courantes sur un marché compétitif.

Bien sûr, il ne s'agit pas de dédramatiser les impacts réels de l'industrie et de renseigner les parties prenantes sur l'ampleur des effets de cette industrie et des milliards de composants mis sur le marché chaque année. Une information normalisée à l'échelle européenne ou mondiale permettrait de montrer les effets prépondérants de cette industrie et de mettre en avant ses responsabilités vis-à-vis de la société et de l'environnement. Toutefois, cette information n'est pas directement utilisable par les concepteurs qui ne sont pas à même de bouleverser les trajectoires technologiques et les usages associés (cf. chapitre 3).

- Note unique : quelles contraintes ?

Le principe de la note unique est apprécié des concepteurs, car il facilite la manipulation des résultats environnementaux. Pour les concepteurs, cela en fait notamment un outil d'aide à la conception, car, mis sous forme de bases de données, les « éco-indicateurs » constituent une aide facile d'utilisation pour le choix de solutions.

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que ce principe de la note unique, destiné à faciliter l'approche de l'éco-conception par les industriels, va à l'encontre des principes mêmes de l'éco-conception, notamment le principe de l'approche multicritère, et que le fait d'agréger un ensemble de résultats, d'une part fait perdre une partie des informations, et d'autre part représente une interprétation de l'information, ce qui pose la question de la pertinence « scientifique », donc de l'exploitabilité des résultats obtenus avec cet outil. L'interprétation des résultats d'ACV doit être extrêmement précise ce qui exige souvent l'expertise d'un spécialiste.

- Résumé

Une normalisation adaptée responsabilise les concepteurs afin de tendre à réduire des impacts disproportionnés par rapport à ce qui se fait en termes de composants (concurrence, techniques en développement). L'intérêt d'une méthode de normalisation est de montrer quelles sont les technologies particulièrement polluantes par rapport à d'autres technologies et qui pourraient tendre à être améliorées en considérant un référentiel significatif ou en fixant un objectif probant. Sur le même principe, si l'on cherche à réduire l'empreinte environnementale, le moyen le plus efficace est de réduire un impact qui est trop important pour un produit microélectronique.

Pour être un support utile pendant la conception, les indications données par l'ACV doivent être pertinentes et compatibles avec le schéma de processus de décision interne et les besoins des ingénieurs. Ces différents éléments ont été pris en compte pour la mise au point d'une méthode de caractérisation et notamment pour la détermination des jeux de facteurs de normalisation et de pondération. Le résultat est un système d'évaluation pour évaluer et comparer les performances des technologies de fabrication.

3.2 Méthode de caractérisation dans le cas de l'entreprise STMicroelectronics

Cette section propose une méthode spécifique pour normaliser et pondérer les performances environnementales de la fabrication d'un composant à partir des scores de caractérisation. Certains résultats seront exprimés sous la forme d'un score unique : c'est un résultat combinant les différents aspects environnementaux significatifs du sous-ensemble ou de la phase du cycle de vie.

- Présentation des indicateurs de suivi pour la gestion environnementale des sites

Pour répondre à la demande des fonctions dirigeantes d'avoir une cohérence avec la stratégie environnementale déjà mise en place, nous proposons une méthode de normalisation et de pondération adaptée au système de management interne de l'entreprise.

Les performances environnementales des sites de STMicroelectronics sont gérées et comparées entre elles grâce à un système appelé « Eco-Footprint », basé sur plusieurs indicateurs (Tableau 34).

Tableau 34 : Indicateurs figurant dans l'EcoFootprint

Catégories d'impact C_i	Unité
Consommation d'électricité	kWh/WO
Consommation d'eau	m ³ /WO
Consommation de produits chimiques	kg/WO
Réchauffement climatique	kg CO ₂ /WO
Déchet (recyclé/réutilisé)	%
Utilisation de matériel	kg/WO
COV	g/WO
Acidification de l'air	g SO ₂ /WO
Eutrophisation	g (P+N)/WO
Métaux lourds*	g/WO
Produits Fluorés**	g/WO

*Spécifique à l'assemblage du boîtier / **Spécifique à la fabrication de la puce

L'Eco-Footprint se calcule de la manière suivante :

$$Eco - Footprint(X) = \sum_{i=1}^7 S_{Ci}(X) / N_{Ci} \times P_{Ci}$$

Avec $Eco-footprint(X)$: performance environnementale d'un site X
 $S_{Ci}(X)$: scores de caractérisation du site X
 N_{Ci} : facteur de normalisation pour la catégorie C_i
 P_{Ci} : facteur de pondération pour la catégorie C_i

Les « standards », autrement dit des scores de référence internes, ont été établis pour fixer les valeurs des facteurs de normalisation et de pondération³⁷. Les valeurs collectées sur les sites sont comparées aux standards de l'entreprise : on obtient une note autour de 1 pour chaque indicateur. Ces notes sont alors présentées sous la forme d'un diagramme-radar (Figure 27). Un ratio supérieur à 1 signifie que les performances du site sur cet aspect sont largement en dessous de ce qui est

³⁷ Les valeurs de ces facteurs ne sont pas précisées pour des raisons de confidentialité

attendu par l'entreprise et que des investissements devraient être faits pour l'améliorer : unités de traitement des COV, système de réutilisation de l'eau, etc. Le système de gestion de l'environnement est géré sur ce concept.

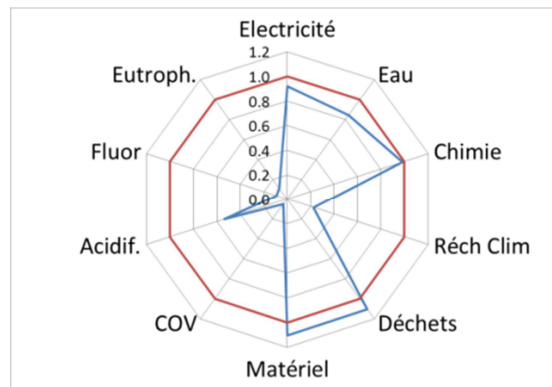


Figure 27 : Présentation de l'EcoFootprint d'un site

- Suggestion d'un jeu de facteurs de normalisation

Pour définir si l'effet environnemental généré par la fabrication est important, une référence doit être imposée. La définition de facteurs en fonction d'un scénario de référence est réductrice. Il existe de nombreuses technologies supportant la fabrication de circuits dont les fonctions ne sont pas comparables : la désignation d'une technologie de référence n'est pas envisageable car ne permet pas de gérer la diversité des circuits. Par ailleurs, la normalisation par la fonctionnalité d'un produit est également complexe : s'il existe des unités comme le DMIPS³⁸ permettant d'évaluer les performances d'un circuit digital en mesurant le nombre d'instructions exécutées par seconde, il est difficile de comparer les fonctionnalités de circuits intégrant des parties analogiques.

Nous suggérons donc que les scores de caractérisation soient normalisés par rapport à des seuils d'acceptabilité. Le seuil d'acceptabilité de chaque catégorie est fixé par le donneur d'ordre, les fonctions dirigeantes et stratégiques de l'entreprise.

Le jeu de facteurs de normalisation proposé correspond à la somme des émissions générées par l'entreprise par unité de production sur une année de référence. En pratique, l'ensemble des flux entrants et sortants sur l'année 2010, année sans évènement marquant de production³⁹, est inventorié pour les usines front-end et back-end. Les impacts associés sont calculés par une ACV puis ramenés à une unité de production : l'empreinte moyenne de l'entreprise en 2010 est ainsi calculée.

Pour la puce, l'unité de production est la plaquette équivalente, une plaquette à 20 niveaux de masques et de diamètre 8 pouces. Les scores normalisés pour une puce sont calculés comme suit :

Pour i allant de 1 à 7, où i représente un indicateur d'impact présélectionnés

$$N_{Ci}(P) = S_{Ci}(P) / N_{Ci} \times n / 20 \times D / 8$$

³⁸ (D)MPIS signifie (Drysthone) millions of instructions per second.

³⁹ Un évènement est un arrêt de production ou des carnets de commande particulièrement vides.

Avec	$N_{Ci}(P)$: score normalisé d'une puce P pour la catégorie d'impact Ci $S_{Ci}(P)$: score de caractérisation d'une puce P pour la catégorie d'impact Ci N_{Ci} : facteur de normalisation pour la catégorie d'impact Ci n : nombre de masque de la puce P D : diamètre en pouces de la plaquette supportant la puce
------	--

Pour l'assemblage du boîtier, l'unité de production est le boîtier, qui comprend un nombre de pins⁴⁰ précis. Les scores normalisés pour un boîtier B quelconque sont calculés comme suit :

Pour i allant de 1 à 7, où i représente indicateur d'impact présélectionnés

$$N_{Ci}(B) = S_{Ci}(B) / N_{Ci} \times p$$

Avec	$N_{Ci}(B)$: score normalisé d'un boîtier B pour la catégorie d'impact Ci $S_{Ci}(B)$: score de caractérisation du boîtier B pour la catégorie d'impact Ci N_{Ci} : facteur de pondération pour la catégorie d'impact Ci p : nombre de pins du boîtier B
------	---

Puisque les impacts de la fabrication d'un produit sont normalisés par rapport à un impact moyen de l'entreprise en 2010, les concepteurs chercheront à réduire les impacts environnementaux de la fabrication d'une technologie ou d'un boîtier qui sont trop importants par rapport à ce qui se fait en moyenne dans l'entreprise pour une unité de production « moyenne ». Il s'agit de donner comme objectif commun aux concepteurs de l'entreprise, la diminution homogène de l'ensemble des impacts générés par les activités de l'entreprise. L'empreinte environnementale globale vise ainsi à diminuer. L'entreprise dans son système de gestion de l'environnement a pour objectif de réduire chaque année les impacts de 5% par catégorie, par unité de production.

L'impact moyen par unité de production est recalculé régulièrement afin de constater les progrès réalisés macroscopiquement sur l'ensemble de l'entreprise et les facteurs de normalisation sont réactualisés tous les cinq ans dans la méthode afin de prendre en compte le renouvellement technologique.

Comme on l'a vu précédemment, la définition de valeurs de référence en fonction de données d'objectifs environnementaux a la particularité d'être dépendante du système considéré. Nous assumons ce choix dans le cas spécifique de l'évaluation environnementale d'un composant microélectronique et d'autant plus qu'il est lié à la stratégie environnementale de STMicroelectronics.

⁴⁰ L'unité « pin » est communément utilisée sur les sites. Un pin correspond à une connexion électrique du boîtier : c'est une bille ou une patte selon la technologie. Cette unité inclut la complexité du boîtier : chaque fois qu'une connexion électrique est rajoutée sur le boîtier, les consommations de produits chimiques, d'électricité et de métaux augmentent.

La Figure 28 montre la contribution des catégories d'impact, selon plusieurs méthodes existantes de référence et selon la méthode utilisant des facteurs de normalisation par unité de production, sur l'année 2010 de référence. Les scores normalisés sont ceux d'une technologie à mémoire non volatile, fabriquée sur le site de Rousset. La méthode de normalisation par unité de production a l'avantage de mettre en avant toutes les catégories d'impact par rapport à toutes les autres méthodes soulignant de façon prépondérante un indicateur. Par ailleurs, la Figure 29 montre les résultats de la normalisation pour trois technologies radicalement différentes fabriquées dans trois sites de production différents. Les résultats sont représentés par unité de surface et par niveau de masque afin de les comparer sur une même échelle. Les résultats normalisés mettent en avant des aspects différents du fait des spécificités des techniques de fabrication.

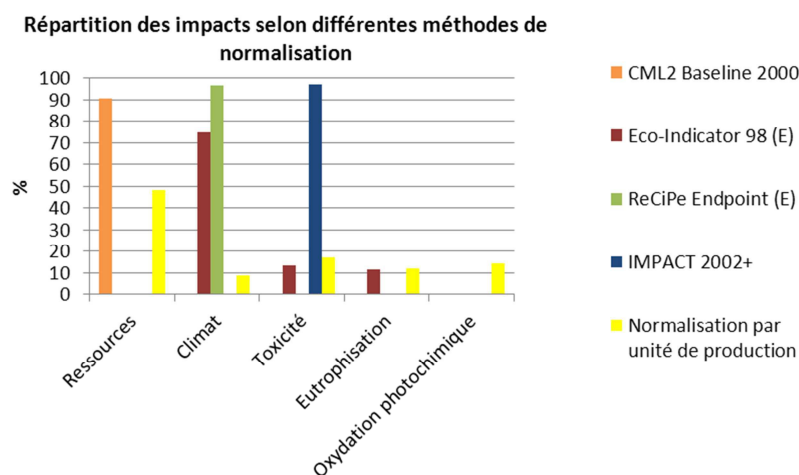


Figure 28 : Comparaison des scores normalisés par différentes méthodes pour la puce (seuil à 5%)

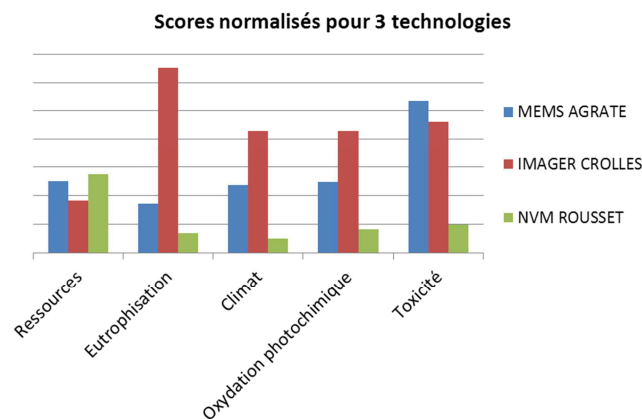


Figure 29 : Normalisation de plusieurs technologies de puces – Résultats par unité de surface et par masque

- [Suggestion d'utilisation du score unique dans le cadre de la mise en place d'un système de management environnemental orienté-produit](#)

En s'inspirant du système existant de calcul de l'indicateur de suivi des performances environnementales des sites, une méthode de pondération est proposée pour le suivi des performances des technologies de fabrication (plaquette pour la puce et boîtier). Il a été défini à partir des facteurs de pondération existants dans l'entreprise. Pour des raisons de confidentialité

L'agrégation des résultats de l'ACV sous la forme d'un score unique est une solution qui permet de qualifier facilement les performances de la fabrication d'un produit. Une telle approche

augmente les chances que les résultats d'ACV soient jugés utiles par les fonctions dirigeantes. Ainsi, les scores normalisés puis pondérés sont agrégés en un score unique, sans unité.

Le score unique est utilisé pour la communication et pour comparer macroscopiquement les technologies de fabrication les unes aux autres. Pour la performance relative des technologies, un système de classification a été créé, avec trois classes (A, B et C) comme décrit dans la Figure 30. Les 25% meilleures (respectivement pires) sont identifiées comme la classe A (respectivement classe C).

Un enjeu alternatif consiste à suivre un système pyramidal et monter dans la pyramide. On fait un renouvellement tous les 5 ans avec une revalorisation de deux seuils haut et bas de façon à ce que les nouveaux seuils délimitent les deux parties supérieures et inférieures. Progressivement, la moyenne des performances des technologies tend à s'améliorer: ce système permet de mesurer et d'encourager les processus d'amélioration continue et de contrôler l'amélioration macroscopique des générations de technologies consécutives.

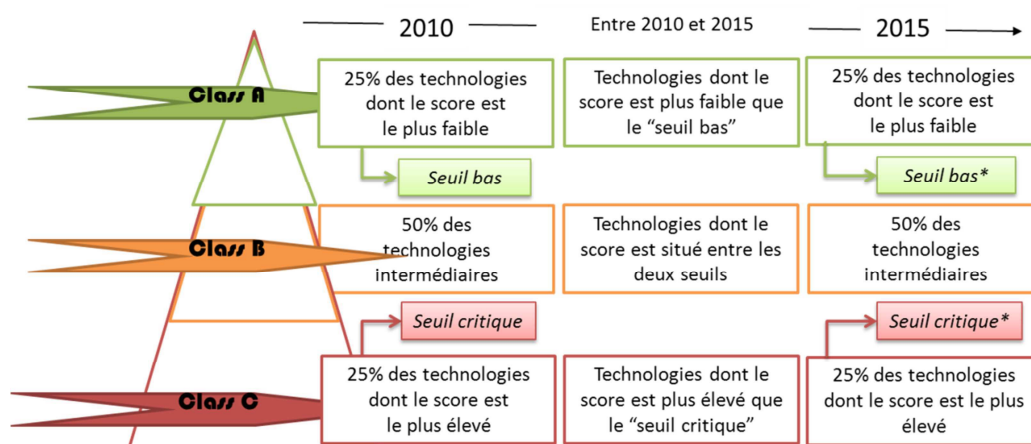


Figure 30 : Système de classification pyramidal

4 Conclusion du chapitre 8

Le fait d'avoir réduit le nombre d'indicateurs puis d'avoir imaginé des méthodes de caractérisation des impacts des différentes entités du composant donne des priorités dans les stratégies environnementales d'une entreprise microélectronique. Cela permet également de bâtir une stratégie précise et cohérente pour l'optimisation environnementale de ces différentes entités. Ces méthodes d'évaluation contribuent à améliorer la connaissance des causes de modifications sur l'environnement. L'indication environnementale est différente selon le sous-ensemble considéré : boîtier, technologie semi-conductrice, procédés de fabrication, matière première ou produit.

La caractérisation environnementale d'un composant oriente les décisions en conception et permet d'évaluer l'efficacité de solutions mises en place à des fins d'éco-conception. A l'heure actuelle, nous recommandons que l'industrie microélectronique limite ses analyses environnementales à certains indicateurs, traduisant de réelles pressions de l'industrie microélectronique sur l'environnement. Cela signifie que l'évaluation des impacts et les transferts se limitent à ces catégories. Lorsque les modèles environnementaux le permettront l'intégration de la localisation des sites dans un pays permettra de comparer la fabrication d'un produit sur plusieurs sites différents et d'intégrer aussi le choix de fournisseurs selon leur localisation.

Toutefois, les spécialistes en ACV critiquent, à juste titre, l'étape de normalisation. Son utilisation en conception a pour intérêt d'attirer l'attention des concepteurs sur les impacts environnementaux qui sont importants par rapport à un objectif atteignable. En normalisant par l'impact environnemental moyen par unité de production, les sources qui génèrent un impact surdimensionné par rapport à l'ensemble sont mises en avant.

Malgré le risque d'erreur dans l'estimation des facteurs de référence, l'utilisation de la normalisation dans un contexte industriel semble raisonnable et utile pour les concepteurs. Cette normalisation assure également que l'entreprise, qui a une responsabilité sur un panel d'effets environnementaux, prenne en considération l'ensemble de ces aspects et tende à les réduire tous et de façon homogène. Les fonctions centrales de l'entreprise peuvent également orienter et influencer sur les choix de conception par des directions stratégiques en utilisant le jeu de facteurs de pondération ainsi qu'un système de classification pyramidale.

Par ailleurs, afin d'assurer une acceptation et une diffusion des principes d'éco-conception, la méthode de normalisation et de pondération est conforme au système de gestion de l'environnement déjà mis en place : les concepts utilisés pour rapporter des impacts environnementaux des sites sont repris dans le cadre d'une politique intégrée des produits.

Chapitre 9 : Modèle environnemental d'un produit microélectronique

Dans les sections précédentes, nous avons présenté l'ensemble des spécificités de la microélectronique pour l'évaluation environnementale d'un produit. Nous supposons que les matériaux, les procédés et les technologies de fabrication de la puce et du boîtier ont été évalués: leurs scores de caractérisation, S_{Ci} , unitaires sont connus pour les cinq catégories d'impact et les deux flux de matières. Dans ce chapitre, nous dressons le modèle environnemental d'un produit microélectronique : nous montrerons comment les paramètres du produit, paramètres de conception ou structuraux, sont directement associables à leurs impacts environnementaux.

1 Evaluation environnementale d'un produit

1.1 Flux d'informations pour l'analyse environnementale

L'impact généré par un composant sur son cycle de vie dépend de l'ensemble de ses caractéristiques : surface, masse, type de boîtier, complexité de la technologie, etc. L'application dans laquelle il est embarqué est aussi un élément déterminant pour le calcul de l'impact. La Figure 31 résume l'ensemble des flux d'informations nécessaires à l'évaluation environnementale d'un produit. Chaque flux est représenté avec l'acteur qui en donne la valeur et qui est « responsable » des paramètres de conception associés, selon le processus de conception décrit dans le chapitre 4.

De nombreux acteurs de l'entreprise interviennent pour la modélisation environnementale d'un produit, y compris certains qui ne sont pas concepteurs.

- L'ingénieur-procédé de production caractérise les procédés utilisés pour la fabrication du semi-conducteur et l'assemblage du boîtier.
- Le technologue, en concevant la route de fabrication de la puce, inventorie les procédés utilisés et donne une information normalisée (impact par unité de surface et par masque) pour la modélisation de la technologie. Il communique aussi le nombre d'opérations pour l'estimation du temps de cycle.
- Le concepteur de boîtier décrit le boîtier par nombre de connexions (I/O pour inputs/outputs). Les informations relatives aux matériaux restants sur le boîtier sont inventoriées d'une part pour calculer la masse du produit final et d'autre part, la composition massique du boîtier influe sur l'impact dus aux traitements de fin de vie.
- L'ingénieur de l'application, en lien étroit avec le client, décrit le scénario applicatif de la puce dans l'application finale à partir du scénario d'utilisation du produit par le client.
- Le designer du circuit décrit les caractéristiques du circuit.
- Le « logisticien » décrit les flux logistiques entre les fournisseurs et l'usine ainsi que le conditionnement des matières premières puis les méthodes d'expédition des produits jusqu'au client. Des scénarios de référence sont mis au point, fonction de la localisation du fournisseur par rapport à l'usine et du conditionnement.

- L'impact environnemental de la salle blanche est connu par le service environnement grâce au système de gestion de l'environnement du site. Pour chaque site, l'impact environnemental moyen par opération dû aux facilités est estimé.
- Le responsable de la gestion de l'environnement des sites dresse les fiches environnementales des produits chimiques pour obtenir leur impact unitaire.

Par ailleurs de informations sont récoltées depuis l'extérieur de l'entreprise : les informations réglementaires, la gestion des DEE par les différents secteurs industriels pour déterminer un scénario moyen de fin de vie selon l'application. Nous considérons le contexte industriel comme extérieur à l'entreprise car le choix de l'implantation d'un site ou de l'orientation sur un segment de marché, est largement dépendant de la stratégie industrielle et de la compétitivité internationale.

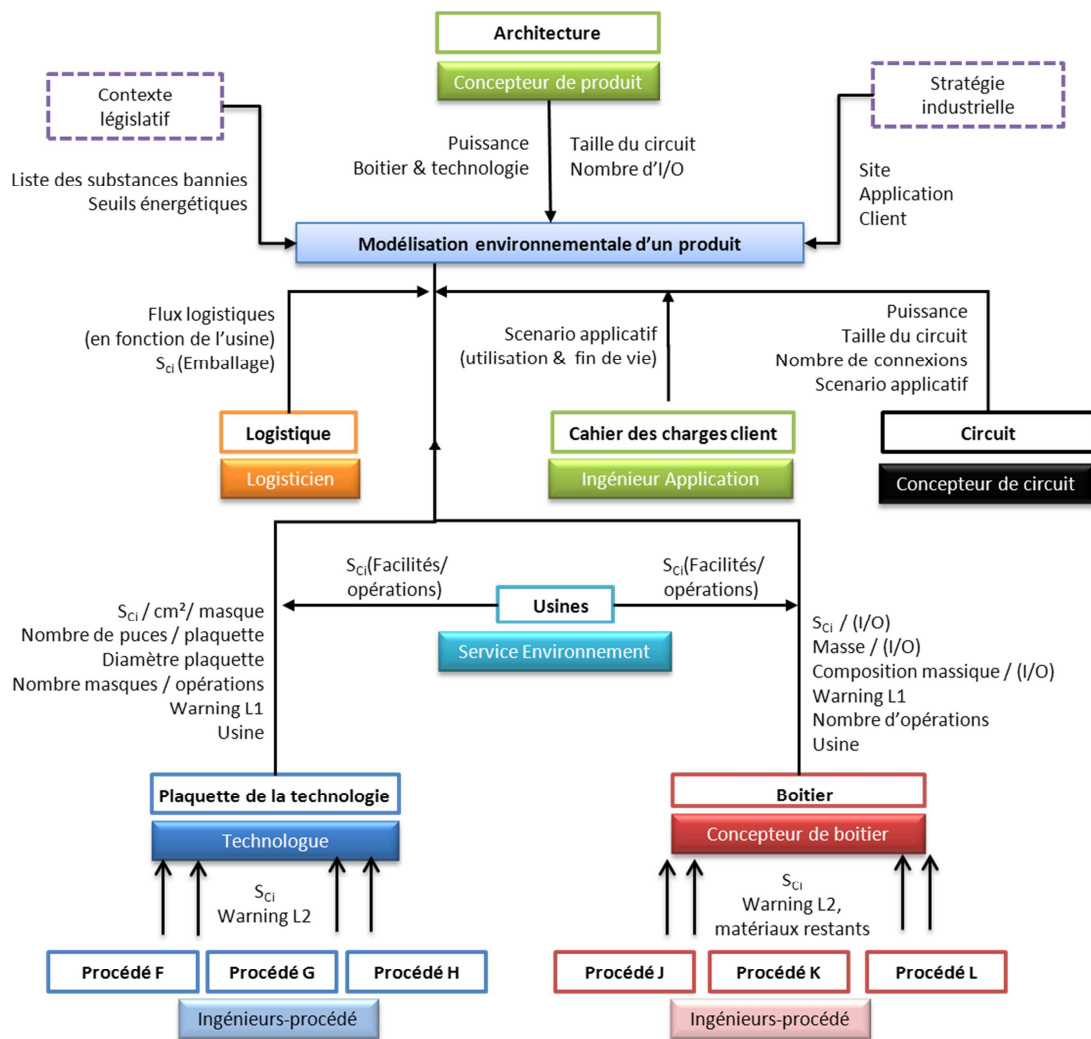


Figure 31 : Flux d'informations pour la modélisation environnementale d'un produit

Note sur les données relatives à la réglementation (Warning L1 et L2): Une information relative aux substances utilisées dans les procédés (warning L2) est donnée par l'ingénieur-procédé pour déclarer l'ensemble des substances utilisées qui doit être déclaré dans le cadre des législations REACH et RoHS même à de seuils non représentatifs. Ces informations seront utiles pour caractériser les procédés ou pour assurer une meilleure prise en compte des agents chimiques dans le cadre de l'évaluation du risque chimique. Au niveau supérieur (boîtier et plaque), seules les substances bannies par RoHS et la quantité précise doivent être délivrées pour dresser le modèle environnemental du produit : on appelle « warning L1 » ce flux d'informations.

1.2 Evaluation environnementale d'un produit en conception : quelles limitations ?

La qualité des informations environnementale est dépendante du stade de la conception et de la connaissance sur le produit. De nombreux paramètres sont interdépendants, c'est-à-dire que :

- au moins deux corps de métier interagissent au cours de la conception pour fixer le paramètre ;
 - un même concepteur doit trouver un compromis entre plusieurs paramètres ;
 - un paramètre ne peut être fixé que lorsqu'un autre paramètre l'a été précédemment.
- Par exemple, l'impact final de la puce ne peut être connu qu'une fois les procédés de fabrication qualifiés, la route de fabrication et la taille de la puce figées.

Des interactions ont par exemple lieu entre du concepteur de produit, le designer qui dessine le circuit et le technologue. Le designer du circuit répond aux exigences fixées par l'architecture⁴¹ : la puissance et la taille du circuit doivent être comprises dans les gammes de valeurs. Ensuite, ces paramètres sont ajustés tour à tour entre le technologue et le designer. Le designer donne en fin de conception les valeurs définitives.

De cet exemple, on comprend que, selon le stade de la conception, la connaissance sur le produit est incomplète ce qui est un frein à une modélisation robuste du futur produit. Pour décrire au mieux un produit en termes environnementaux, il faut identifier selon le stade de la conception comment certaines informations peuvent être évaluées afin d'engendrer le moins d'incertitude.

2 Evaluation et optimisation environnementale d'un produit en conception

2.1 Paramètres-clé du produit et responsabilités environnementales des concepteurs

Une mesure fiable de l'impact d'un composant correspond à la mesure de trois paramètres indépendants : l'impact de la matérialisation du composant ; l'énergie utilisée par le composant pendant son utilisation ; l'impact dû aux décisions stratégiques. La matérialisation d'un produit est liée à l'ensemble des effets dû à sa réalisation physique : l'extraction et la fabrication des matières premières, la fabrication du produit et le traitement prévu lors la fin de vie sur les matériaux restants sur le produit. Cette notion inclut autant la matérialisation primaire (matériaux composants le produit) que la matérialisation secondaire (cf. chapitre 2, section 3-1).

Ce sont les paramètres-clé du niveau le plus élevé, notés KP-L0 (pour paramètres-clé de niveau 0). Du fait de la stricte séparation entre la fabrication et la conception du circuit, ces trois paramètres sont optimisés séparément. Les acteurs contribuent tour à tour à ajuster la structure géométrique, les fonctionnalités, les propriétés mécaniques et électriques et autres performances: les KP-L0 évoluent donc constamment. Par exemple, plusieurs acteurs fixent l'impact de la matérialisation : le technologue via le choix des matériaux ou le concepteur du boîtier via le volume donné au boîtier. Les actions de ces concepteurs sont mieux appréhendées via les sous-paramètres « choix des matériaux » et « volume du boîtier ».

Le suivi des indicateurs environnementaux pendant la conception s'avère difficile depuis ce niveau macroscopique L0. Il s'agit alors de trouver des paramètres de niveaux inférieurs dépendants d'une seule équipe de conception. N'importe quel produit peut être décrit par un ensemble de

⁴¹ On rappelle que la phase de « conceptual design » est réalisée conjointement entre l'ensemble des acteurs.

paramètres-clé à différents niveaux d'abstraction : les Tableau 35, Tableau 36 et Tableau 37 présentent les paramètres-clé des niveaux supérieurs et les acteurs responsables de ces paramètres de conception. On note ces paramètres-clé KP-Lx, où x correspond au niveau d'abstraction sous lequel le produit est considéré. Le lien entre paramètres de conception et responsabilité environnementale des concepteurs et le stade auquel le paramètre est figé est donc établi grâce à la lecture des paramètres-clé. Pour certains paramètres, la description est réalisée à des niveaux d'abstraction très bas : c'est le cas notamment de la réalisation physique du produit (Tableau 38).

Tableau 35 : KP-Lx liés au KP-L0 « matérialisation du produit »

KP-L1	KP-L2	KP-L3	Acteur	Phase
Matériaux	Substances sensibles	Substances bannies Substances toxiques / dangereuses	Concepteur boîtier et technologue et ingénieur-procédé R&D	Détaillée
	Alliages délétères pour le recyclage	X	Concepteur boîtier	Détaillée
	Choix d'un matériau en fonction de l'impact du fournisseur à l'usine	Fournisseur Procédé de fabrication Conditionnement Moyens de transport	Achat	Indépendant de la conception
Boîtier	Route d'assemblage	Modules Temps de cycle	Concepteur boîtier	Détaillée
	Surface du boîtier	Pitch	Concepteur boîtier	Détaillée
		Nombre de connexions*	Concepteur circuit	Préliminaire
	Epaisseur du boîtier	Matériau de moulage Epaisseur du boîtier Méthode d'assemblage Contraintes mécaniques de l'application	Concepteur boîtier et Ingénieur-procédé R&D ;	Préliminaire et détaillée
Technologie semi- conductrice	Route de fabrication	Modules Temps de cycle	Technologue	Préliminaire et détaillée
	Nombre de puces par plaquette	Surface de la puce	Technologue et concepteur du circuit	Préliminaire
		Diamètre de la plaquette	<i>Dépend de la stratégie industrielle (site)</i>	x
		Nœud technologie	<i>Dépend de la technologie</i>	x
Composants	Composants actifs	Nombre Type	Concepteur du circuit	Préliminaire
	Composants passifs	Nombre Type	Concepteur du circuit	Préliminaire
Emballage (expédition plaquettes, produits finis)	Dimension	Pourcentage volumétrique	Logisticien	Indépendant de la conception
	Pourcentage de réutilisation	X	Logisticien	Indépendant de la conception
	Matériaux	X	Logisticien	Indépendant de la conception

Tableau 36 : KP-Lx liés au KP-L0 « intégration dans l'application »

KP-L1	KP-L2	KP-L3	Acteur	Phase
Concept	Architecture	Schéma-bloc Fonctionnalités Nombre de connexions* Surface de la puce Choix d'une technologie	Concepteur du circuit	Préliminaire
		Scenario d'application Séquençage des tâches Modes (stand-by, spécifiques)	Designer du circuit	Préliminaire et détaillée
	Durée de vie du produit	Robustesse Fiabilité	Ingénieur application	Préliminaire
			Technologue et concepteur du boîtier	Détaillée
Consommation électrique	Puissance des modes	Cellule Design Kit	Designer du circuit	Préliminaire et détaillée

Tableau 37 : KP-Lx liés au KP-L0 «Stratégie industrielle »

KP-L1	KP-L2	KP-L3	Acteur	Phase
Choix des marchés	Application	Scénario d'utilisation Scenario de fin de vie	X	Indépendant de la conception
	Clients	x	Marketing	Indépendant de la conception
Choix de sites de fabrication et test	Localisation	x	X	Indépendant de la conception
	Gestion de l'environnement	Facilités Unités de traitement	Service environnement	Indépendant de la conception

Tableau 38 : Niveaux d'abstraction pour les route de fabrication (de la technologie et de l'assemblage)

KP-L2	KP-L3	Acteur	KP-L4	KP-L5	Acteur
Route de fabrication (intégration)	Modules Temps de cycle	Concepteur boîtier ou Technologue	Procédés de fabrication	Flux entrants/sortants Matières restantes Temps de cycle	Ingénieur-procédé R&D

On notera qu'une caractérisation des impacts du cycle de vie utilisant les paramètres de plus bas niveau engendre moins d'erreurs dans la mesure de l'impact environnemental puisque les modèles associés n'amènent pas a priori d'hypothèses. Toutefois la connaissance sur ces paramètres inférieurs est faible au début de la conception et augmente au fur et à mesure que le développement avance.

2.2 Définition du produit microélectronique éco-conçu

[De Grave'07] propose une liste du type d'exigences et d'attributs qui doivent être considérés du point de vue de l'environnement et ce à travers le cycle de vie du produit. Afin d'intégrer l'environnement en conception, les problèmes environnementaux identifiés par les « voice of customer » (VOC) sont confrontés aux paramètres techniques, les «engineering metrics » (EM). Les EM sont en fait les paramètres du produit sur lesquels les concepteurs peuvent agir, les KP-Lx précédemment identifiés.

Les VOC ont été définies simplement de façon à couvrir la plupart des problèmes environnementaux liés au cycle de vie de produits microélectronique. Nous supposons en effet que les industries consommatrices de produits microélectroniques considèrent les impacts

environnementaux de toutes les phases du cycle de vie sans a priori préalable. Selon [Brezet'97-b], les stratégies d'éco-conception peuvent être en règle générale réparties en huit catégories et décrites selon 8 axiomes ;

- Réduire le nombre de matériaux et sélectionner les plus écologiques ;
- Réduire l'impact de la phase de production ;
- Optimiser la distribution ;
- Réduction des impacts lors de l'utilisation du produit ;
- Etendre la durée de vie d'un produit ;
- Simplifier le désassemblage du produit ;
- Favoriser la réutilisation par la conception ;
- Favoriser le recyclage par la conception.

En considérant cette liste, il est facilement compréhensible que ces axiomes de haut-niveau sont adaptables à la plupart des produits manufacturés et que les différentes stratégies proposées sont traductibles dès les phases de définition du cahier des charges. D'après [Gungor'99], l'éco-conception englobe les pratiques, dites DfX (« Design for X ») : chacune de ces DfX traite séparément de problématiques environnementales mais l'alliance de ces règles assure de considérer toutes les formes que peut prendre l'éco-conception d'un produit. L'intégralité de ces règles n'est, bien entendu, pas appropriée et utilisable pour l'éco-conception du produit microélectronique, notamment les règles de DfX sur la fin de vie, largement utilisées dans les industries soumises à des textes réglementaires obligeant sa prise en compte. La faible dimension du composant rend impossible toute tentative de désassemblage, maintenance, réutilisation [De Grave'07]. Les VOC sont définies alors simplement comme la volonté de réduire l'impact du produit sur tous le cycle de vie, en considérant uniquement les stratégies pertinentes pour le produit microélectronique.

En fonction de ces VOC regroupées selon la phase du cycle de vie concernée, les réponses que les concepteurs de produits microélectroniques peuvent apporter sont résumées dans le Tableau 39. Nous considérons, ici, un dispositif microélectronique, ce qui comprend les produits vendus sous la forme d'une carte comprenant plusieurs composants semi-conducteurs, connectés à des composants passifs.

Nous considérerons qu'un produit éco-conçu est un produit pour lequel l'intégralité des items et des impacts associés sur le cycle de vie ont été considérés de façon exhaustive pendant la phase de conception. Il s'agit de vérifier que l'ensemble des KP-L1 ont été considérés au moins par le biais d'un KP-L2 ou de niveaux inférieurs. Grâce à cette modélisation du produit éco-conçu, les ingénieurs identifient les caractéristiques de conception sur lesquels se concentrer dans les stades précoces du développement du produit puisqu'ils sont « responsables » de l'impact environnemental associé.

Tableau 39 : Lien entre VOC et EM pour la conception d'un dispositif microélectronique

Phases	VOC	Impact des KP-L2 de "Matérialisation" sur le cycle de vie	Impact des KP-L2 de "Intégration dans l'application" sur le cycle de vie	Impact des KP-L2 de "Stratégie industrielle" sur le cycle de vie
Extraction des matières	-Réduire le nombre de matériaux -Sélectionner les matériaux les plus écologiques	-Impact du fournisseur -Procédés -Route -Dimensions -Réutilisation de l'emballage -Composants (nombre et type) dans le dispositif	-Energie en utilisation	-Localisation du site -Gestion environnementale du site
Fabrication	-Faciliter la fabrication et l'assemblage -Réduire l'impact de la production	-Route (temps de cycle, nombre d'opérations) -Dimensions -Nombre de connexions -Substances toxiques / dangereuses	x	-Localisation du site -Gestion environnementale du site
Distribution	-Faciliter le transport -Optimiser la distribution -Minimiser l'emballage	-Approvisionnement par le fournisseur -Volume et masse de chaque composant et de l'emballage		-Localisation du site -Localisation du client
Utilisation	-Adapter la durée de vie à l'application -Tendre à la neutralité pour l'environnement lors de l'utilisation -Favoriser les fonctions qui économisent de l'énergie	x	-Puissance des modes -Cycle d'utilisation -Architecture (adaptée à l'application) -Durée de vie	Choix des marchés (client, application)
Fin de vie	-Favoriser la réutilisation par la conception -Réduire les risques lors des traitements en fin de vie	-Matériaux restants -Alliages délétères pour le recyclage -Substances bannies par la réglementation	x	Choix des marchés (client, application)

Comme expliqué dans le chapitre 7, le profil environnemental d'un produit « moyen » ne permet pas de donner des exigences prioritaires sur la phase du cycle de vie au concepteur de produit. La stratégie d'éco-conception peut globalement se résumer comme suit :

- En début de conception, dans les phases préliminaires,
 - l'optimisation des paramètres est du ressort du concepteur de circuit qui devra observer les transferts entre les phases. Les décisions relatives au choix du concept de la technologie et du boîtier, à la définition de la taille et de l'architecture du circuit ont un effet primordial sur le futur impact environnemental du produit.
 - Le fait d'agir dans la phase de conception préliminaire est un axiome vrai pour tous les produits, mais du fait de la stricte séparation entre conception du circuit et fabrication, cet effet est amplifié. Certains paramètres-clé sont fixés dès le début de la conception, limitant largement la future marge de manœuvre des autres acteurs pendant la

conception détaillée. Une méthodologie d'éco-conception doit donc intervenir dans la conception préliminaire du circuit.

- L'impact environnemental généré par un produit est considéré depuis un niveau macroscopique très élevé, en estimant la valeur que prendront les KP-L1.
- Pendant la conception détaillée, les transferts de pollution entre les phases sont limités :
 - l'optimisation de la fabrication, en prenant en compte l'impact aval des fournisseurs, est entièrement du ressort des concepteurs R&D, technologue, concepteur de boîtier et ingénieur-procédé. Les activités de chacun étant séparées, l'optimisation environnementale l'est aussi.
 - l'optimisation de la phase d'utilisation est liée uniquement à l'efficacité énergétique du circuit. Le designer du circuit est donc responsable de cette phase.
 - l'optimisation de la fin de vie est du ressort du concepteur de boîtier : il pourra donc observer les transferts de pollution entre la fabrication et la fin de vie, en notant toutefois que l'impact de la fin de vie est négligeable.
 - l'impact environnemental généré par un produit est considéré depuis des niveaux plus microscopiques, en estimant la valeur que prendront les KP-L2, KP-L3 et de niveaux inférieurs encore si le niveau de connaissances sur le produit le permet.

3 Conclusion du chapitre 9

Le produit microélectronique est un produit complexe pour lequel l'évaluation environnementale par une ACV soulève de multiples problématiques. Après avoir identifié les principales difficultés en préambule, des éléments de réponses sont apportés pour faciliter la caractérisation de n'importe quel produit microélectronique sur son cycle de vie. La principale réponse à ces difficultés est de segmenter le produit sur son cycle de vie pour construire le modèle environnemental à partir de paramètres de conception pertinents dont l'influence sur l'environnement est identifiée. Grâce à l'identification des flux d'information nécessaires à la modélisation du cycle de vie d'un produit et une fois les rôles et responsabilités des acteurs établis et replacés dans le contexte de conception, nous avons établi les liens entre conception, fabrication et leurs impacts environnementaux respectifs. Cette caractérisation environnementale du produit microélectronique permettra d'établir des méthodes d'éco-conception adaptées aux spécificités de ces concepteurs.

Un produit microélectronique éco-conçu est un produit pour lequel les acteurs responsables des paramètres de conception ont mesuré l'impact de leur tâches en conception et ont pris des décisions permettant d'en diminuer l'impact environnemental. A l'issue de ce chapitre, une méthode de caractérisation des impacts environnementaux spécifique pour les produits issus de la microélectronique a été imaginée et décrite. Nous pouvons donc supposer que le concepteur est capable d'acquérir la connaissance sur les impacts environnementaux générés par ses activités. Dans la partie suivante, nous nous proposons d'outiller le concepteur pour qu'il puisse prendre des décisions en fonction des performances environnementales de différentes options en conception.

Partie III

Intégration de l'éco-conception dans une entreprise microélectronique

Chapitre 10 : Green-ST, plateforme d'éco-conception

À chaque étape de la conception, et pour chacun des objets⁴² ou sous-systèmes des composants microélectroniques, des enjeux environnementaux se distinguent. Face à ces différents problèmes, le développement des outils et méthodes est planifié au plus proche des concepteurs. Afin de s'adapter au mieux aux besoins et aux aptitudes des concepteurs, une plateforme embarquant trois outils a été développée avec la collaboration d'équipes-pilote. Les outils fournissent des indicateurs d'évaluation de l'impact environnemental⁴³ (IE) du futur produit, dès la définition de son concept.

Dans ce chapitre dont l'objectif est de présenter la plateforme *Green-ST*, nous verrons premièrement les étapes fondamentales de son développement. Ensuite, nous étudierons les vecteurs d'intégration de l'environnement dans le processus de développement de composants microélectroniques. Nous concluons ce chapitre par la description macroscopique du cahier des charges et du schéma de la méthodologie.

1 Etapes fondamentales du déploiement de la méthodologie

L'introduction de la dimension environnementale dans les activités de conception est un processus délicat, d'autant plus dans le secteur microélectronique qui a des particularités qui sont à même de complexifier encore cette intégration. Si l'on se propose de faire un constat très général du niveau de maturité de l'éco-conception dans les entreprises, on note deux éléments marquants. D'une part, il existe de multiples outils et méthodes d'éco-conception dont l'utilisation en entreprise est anecdotique. D'autre part, les entreprises confrontées à des pressions externes croissantes ont tendance à développer en urgence des stratégies d'éco-conception intuitives et partielles. De ce fait, pour éviter des échecs successifs dans l'intégration, il apparaît nécessaire de mettre à disposition de l'expert éco-conception, intégrateur des démarches d'éco-conception dans l'entreprise, des mécanismes facilitant le pilotage sur le long terme.

1.1 Cheval de Troie Méthodologique pour l'introduction de l'éco-conception dans les pratiques des concepteurs

Pour le développement d'une méthodologie d'éco-conception pour le secteur microélectronique, nous utilisons un mécanisme qui repose sur la maîtrise de la conception d'un outil d'éco-conception par l'ensemble des acteurs du processus de conception. Il a été nommé « Cheval de Troie Méthodologique » [Reyes'09] car la stratégie sous-jacente est d'introduire un prétexte de travail collaboratif (l'outil d'éco-conception à co-construire) pour fournir la compétence à l'entreprise et la rendre autonome sur les programmes d'éco-conception ultérieurs. Ce mécanisme génère une impulsion décisive au processus d'intégration. Selon [Reyes'07], ce Cheval de Troie Méthodologique a deux avantages : il « favorise la propagation des connaissances en éco-conception à tous les niveaux de l'entreprise » et « permet à l'entreprise de progresser le long d'une trajectoire d'intégration en passant d'une démarche d'éco-conception partielle à une méthodologie d'éco-

⁴² Le terme « objet » désigne indifféremment les trois ensembles relatifs à la conception d'un nouveau produit : technologie semi-conductrice, boîtier, circuit.

⁴³ Par la suite « impact environnemental » est noté IE

innovation compatible avec les exigences d'un développement durable ». La Figure 32 décrit les cinq étapes du mécanisme du Cheval de Troie.

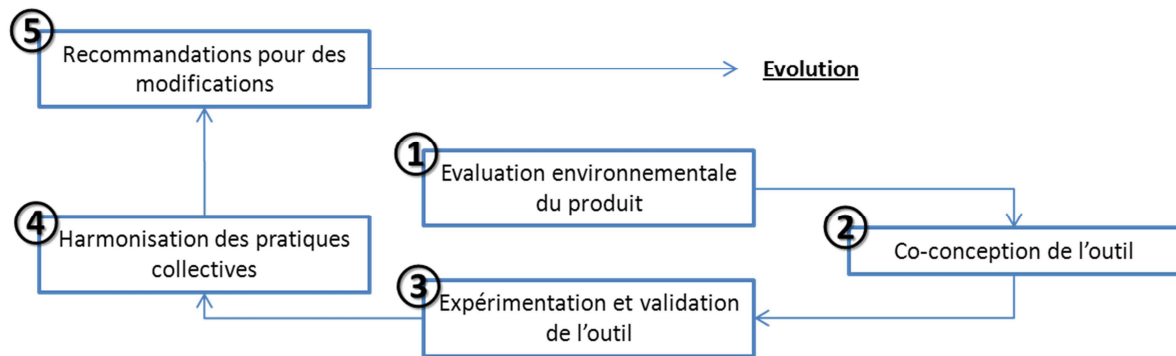


Figure 32 : Structure du mécanisme du Cheval de Troie Méthodologique [Reyes 07]

Les étapes sont les suivantes : l'évaluation environnementale des produits à l'aide d'un outil existant ; la co-conception de l'outil adapté aux processus internes de conception de l'entreprise ; l'expérimentation de l'outil et validation par les futurs utilisateurs ; l'appropriation de l'outil par l'ensemble des acteurs concernés facilitant une harmonisation des pratiques collectives ; la prise en compte des recommandations proposées par les utilisateurs, et enfin la progression vers des pratiques compatibles avec les valeurs du développement durable.

Durant la thèse, nous avons tenu à suivre ces étapes pour la création, le développement puis l'implémentation réelle de la plateforme dédiée à l'éco-conception de produits microélectroniques.

- Evaluation environnementale du produit

Dans la première partie des travaux de recherche, des outils-experts ont été utilisés pour connaître les impacts environnementaux générés par un produit sur son cycle de vie. Nous avons choisi la méthodologie d'ACV pour évaluer les impacts. Comme on l'a dit dans la Partie I, l'ACV est l'outil le plus efficace pour l'évaluation environnementale et donc le plus approprié pour faire émerger les connaissances initiales nécessaires à la conception de l'outil d'éco-conception. Cependant, en raison de sa lourdeur, du temps et de l'expertise qu'elle requiert, l'ACV est un outil dont l'utilisation est généralement difficile en entreprise.

L'ACV-simplifiée est une méthode traditionnelle dont les principes reposent sur l'ACV, mais dont on a cherché à simplifier les difficultés inhérentes. Cette simplification répond aux besoins suivants :

- Diminuer le temps requis pour l'évaluation environnementale ;
- Evaluer les impacts pendant la conception sans connaître les caractéristiques du produit fini ;
- Faciliter l'interprétation des résultats.

Grâce à une meilleure maniabilité et un temps de mise en œuvre réduit par rapport à l'ACV, l'ACV-simplifiée permet une diffusion élargie des pratiques d'évaluation environnementale au sein de l'entreprise. Bien que la simplification se fasse au détriment de la rigueur scientifique, donc de la fiabilité des résultats, l'ACV-simplifiée se révèle être un bon compromis entre la pertinence des résultats et le potentiel d'utilisation dans l'entreprise. C'est également un outil intéressant pour l'amélioration (évaluation des solutions, aide à la décision et validation des choix de conception).

Outre l'ACV, pour caractériser le produit en termes environnementaux, l'ensemble des matériaux utilisés lors de la fabrication est décrit afin d'identifier ceux qui sont susceptibles d'être dangereux, toxiques, rares, délétères pour le recyclage ou encore soumis à des problèmes éthiques.

La centralisation des connaissances sur les impacts environnementaux des produits par l'expert éco-conception augmente sa propre expertise. Celui-ci échange avec les différents acteurs du cycle de vie, en ayant la connaissance du métier (outils utilisés, pratiques en conception) et des impacts générés par les activités de ce métier. De plus, la communication de résultats d'ACV a comme vertu de sensibiliser les concepteurs. Nous avons constaté que la collecte de données pour l'ICV sensibilise les équipes à l'impact réel de leurs activités sur l'environnement et donne des axes d'amélioration. Annoncer des chiffres, multipliés par les milliards de produits vendus par an, est aussi très remarquable. Cet échange est une étape préliminaire engendrant une dynamique d'éco-conception.

- Co-conception de l'outil

[Rio'11] suggère une approche participative pour le développement des outils d'éco-conception, à l'image de nombreux logiciels utilisés dans d'autres domaines [Granoller'03]. Un co-développement permet de faire évoluer simultanément les points de vue. Les outils ont été développés avec la collaboration d'équipes de conception. Un responsable a été défini dans chaque groupe, comme contact privilégié de l'intégrateur.

Une fois les groupes briefés sur les enjeux et concepts, l'écriture d'un cahier des charges fonctionnel pour un outil d'éco-conception a été effectuée. Le groupe de travail a émis des requêtes relatives à l'utilisation et au format des indications reçues. Les séances des groupes de travail se sont articulées autour de cinq axes :

1. des phases de préparation : il s'agit d'appréhender le niveau de compréhension et de sensibilisation puis les attentes, explicites ou implicites, des concepteurs ;
2. des phases de sensibilisation : des cas d'études représentatifs sont présentés pour montrer la nature des informations obtenues par l'évaluation environnementale ;
3. des phases de brainstorming : à partir d'une question ouverte, le groupe propose des solutions, sans intervention de l'expert sur la faisabilité ; les étapes d'un brainstorming sont : recherche, regroupement et combinaison des idées, conclusion.
4. des phases de résolution de problème : à partir d'une question sur un problème défini, le groupe cherche la meilleure solution, quitte à faire intervenir des experts.
5. des phases de restitution : elles ont pour but de reformuler les résultats des phases précédentes. Un travail bibliographique est effectué pour voir les solutions existantes en réponse aux idées émises lors des séances.

Le processus d'assimilation des idées et d'acquisition de connaissances est présenté dans la Figure 33.

Le co-développement des outils assure une meilleure appropriation par les utilisateurs, ainsi que la cohérence avec le processus de conception. Une analyse des pratiques des concepteurs par immersion de l'intégrateur dans l'entreprise a largement favorisé ce co-développement, et notamment la participation régulière aux réunions de conception de produits a permis d'assimiler l'organisation du travail. Les séances des groupes de travail ont représenté des phases formelles

mais les phases informelles (pause-café, pause-déjeuner) ont aussi été utiles pour réaffirmer certaines idées énoncées durant les séances. De plus, les phases de consolidation ont été réalisées intégralement avec le responsable éco-conception de l'équipe. Le rôle-clé de ce responsable est de contrôler la faisabilité technique de l'approche proposée du point de vue du concepteur.

Toutefois, la cohérence n'est pas seulement l'affaire de l'utilisateur : les équipes dirigeantes doivent être sensibilisées à l'utilisation de l'outil. En effet, les directions stratégiques doivent être alignées avec les indications données par l'outil.

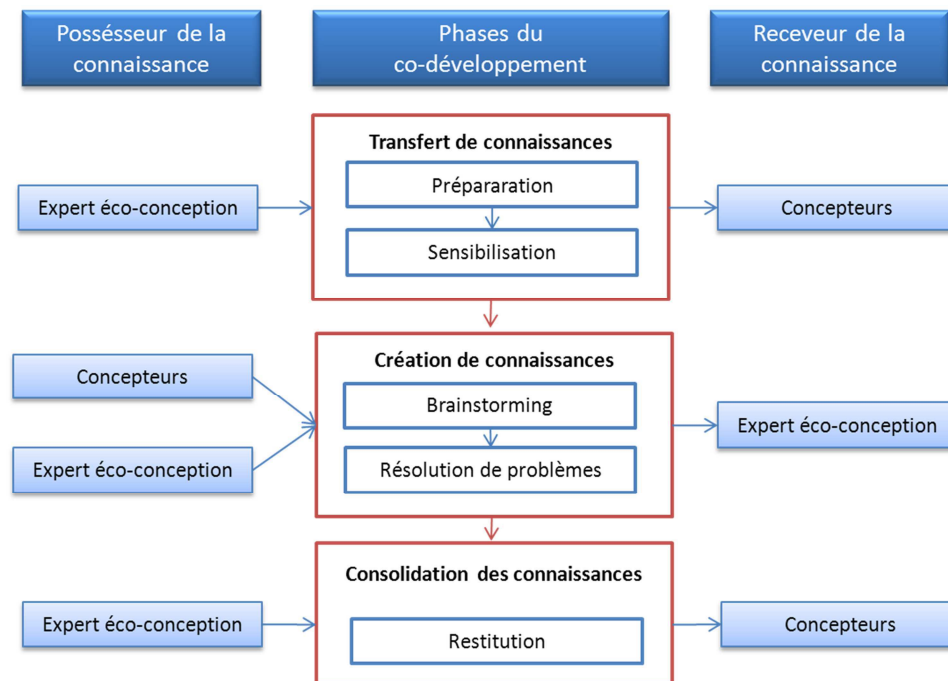


Figure 33 : Processus d'acquisition de la connaissance selon différentes phases du co-développement

- Expérimentation et validation de l'outil

Selon [Reyes'07], « l'expérimentation de l'outil dans les projets de conception permet de valider sa cohérence dans le processus de conception ». Les outils sont testés sur des cas d'études concrets. Ces cas d'études ont donné lieu à certaines évolutions du cahier des charges de la méthodologie, notamment pour la visualisation des résultats. De plus, les outils doivent intégrer la complexité des interactions du pilotage du projet. Leur présentation dans plusieurs équipes et sites, où les cultures y sont différentes, amènent de nouveaux changements, particulièrement dans la saisie des données.

Les outils prototypes, sous forme de démonstrateurs, sont présentés à plusieurs reprises aux équipes selon un processus participatif de séances de démonstration et sont testés et validés en revue de conception sur des cas d'études réels. Il s'agit alors de tester le temps d'appropriation et de mise œuvre par l'utilisateur et la flexibilité.

- Harmonisation des pratiques collectives

Selon [Baumann'02], l'intégration de l'éco-conception dans l'entreprise est liée à la modification du flux de conception qui elle-même doit être associée à des modifications des procédures internes. En effet, tout au long de la conception, les ingénieurs suivent et respectent des procédures. Celles-ci fournissent des règles, communes à l'entreprise, pour la qualification des nouveaux produits et pour le lancement en production. L'objectif est de certifier l'efficacité des activités en assurant

l'optimisation des délais, la gestion des volumes de production, la qualité et la fiabilité des produits. Elles donnent des règles aussi sur le pilotage du projet : le fonctionnement des équipes et les documents à fournir.

En général, l'utilisation de nouveaux outils et méthodes amène des difficultés d'assimilation et d'organisation du travail [Bassetti'02]. Dans notre cas, la modification des procédures permet de décrire les changements au niveau individuel et organisationnel. De plus, pour répondre à un objectif de duplication à l'échelle de l'entreprise, cette modification pérennise les concepts d'éco-conception car cette étape est celle où les fonctions dirigeantes valident la méthodologie.

La mise en œuvre de la méthodologie requiert, on le verra, un minimum de coordination entre les équipes, notamment car certains flux d'informations sont interdépendants. Le déploiement des outils sur différents sites nécessite la mobilisation de l'ensemble des acteurs du cycle de vie. La diffusion et l'utilisation progressive de l'outil par les acteurs concernés facilitent l'harmonisation de pratiques collectives et donc leur diffusion au sein de l'entreprise. Il s'agit d'informer équitablement les acteurs et de s'assurer que le niveau de sensibilisation est équivalent entre les organisations de l'entreprise. Cette étape de sensibilisation s'accompagne de nouvelles activités de prise en main par les futurs utilisateurs.

L'issue de ce travail est d'obtenir le profil environnemental d'un produit à différents moments du processus de conception, tout en ayant incité le concepteur à prendre des décisions en faveur de l'environnement ou au moins en lui ayant donné les informations nécessaires à une prise de décision qui irait en faveur de l'environnement. Des résultats environnementaux sont délivrés lors des revues de conception tout au long du développement. L'outil est alors testé non pas à l'échelle d'une équipe de conception mais sur la collaboration entre plusieurs.

- [*Recommandations pour des modifications*](#)

Au fur et à mesure du Cheval de Troie Méthodologique, les recommandations des futurs utilisateurs sont prises en compte pour l'enrichissement de l'outil et lorsque des suggestions ne sont pas retenues, une explication est fournie pour éviter les frustrations. Les recommandations d'amélioration facilitent la progression des valeurs de l'entreprise en assurant l'adhésion des acteurs. Les fonctionnalités sont améliorées progressivement tout en veillant à ne pas complexifier la structure originelle de l'outil.

1.2 Mesure de l'efficacité de l'intégration de la méthodologie

Nous proposons de suivre l'efficacité de l'intégration et le niveau d'acceptabilité par les utilisateurs et leurs dirigeants. Il s'agit de connaître l'utilisation réelle de l'outil et son taux de propagation dans l'entreprise : nous proposons de suivre des indicateurs simples et facilement quantifiables, résumés dans le Tableau 40. Les indicateurs sont séparés en deux niveaux. Les premiers, concernant l'individu et les pratiques du concepteur, mesurent l'appropriation par l'utilisateur. Les seconds, relatifs à l'entreprise, mesurent la propagation des pratiques d'éco-conception dans l'entreprise.

Tableau 40 : Indicateurs suivis pour mesurer l'efficacité de l'intégration de l'outil

Niveau	Indicateurs	Mesure
Individu	Nombre d'utilisations et leur fréquence dans les projets de conception	Appropriation par les utilisateurs
	Nombre de personnes utilisant l'outil dans leurs activités	Appropriation par les utilisateurs ; Cohérence aux besoins des utilisateurs ;
Entreprise	Nombre de versions	Capacité de l'organisation à enrichir l'outil ;
	Pourcentage d'équipes utilisant l'outil	Propagation de l'outil dans l'organisation;
	Pourcentage du revenu annuel réalisé sur les produits pour lesquels les outils sont utilisés	Propagation des pratiques d'éco-conception dans l'organisation

2 Vecteurs d'intégration de l'environnement en conception de composants microélectroniques

Pour [Millet'03], l'éco-conception, par nature, provoque des changements dans l'entreprise et mène à l'acquisition de nouveaux outils, à la modification du processus de conception et à la création de nouvelles connaissances. Les outils et méthodes⁴⁴ s'inscrivent dans une stratégie industrielle couvrant l'ensemble des produits : leur articulation doit permettre de mener une politique pérenne de système de gestion environnementale orienté-produit. Dans cette partie, nous verrons l'ensemble du travail préliminaire réalisé dans la phase de co-conception de la plateforme.

2.1 Identification des clés pour le déploiement, la duplication et l'industrialisation

Malgré la sensibilité croissante des entreprises vis-à-vis des principes d'éco-conception, l'application de pratiques et l'utilisation d'outils sont limitées dans tous les secteurs d'activité [Baumann'02]. Au préambule du déploiement dans l'entreprise, l'utilisation de ressources d'éco-conception n'est pas généralisée à l'ensemble des acteurs concernés, les concepteurs, mais est plutôt réservée aux experts environnementalistes ou alors les études sont sous-traitées à des cabinets de conseil et à des universités [Lenox'96]. Depuis, des méthodes empiriques ont été développées par des universités et testées sur des cas d'étude industriels sans donner de suite stratégique dans l'entreprise. Une des causes de ce constat, même si elle n'est pas forcément la principale, est « l'isolation » de la méthodologie [Baumann'02] : les utilisateurs ne sont pas privilégiés lors du développement et leur expérience est mise à l'écart au profit de l'opinion des fonctions dirigeantes. Certes le support et l'impulsion des dirigeants sont nécessaires pour le déploiement, mais la relation de l'utilisateur à l'outil est primordiale : expérience, relation émotionnelle, degré d'interaction, influence et responsabilité dans l'utilisation [Janhager'05].

[Lofthouse'06] décrit une série de conditions et prérequis pour un outil d'éco-conception. Un outil performant propose un service facile (orientation, information et sensibilisation), contient de l'information et stimuli, permet une visualisation des résultats, est adapté au langage de l'entreprise et est accessible en termes de contraintes de temps. [Le Pochat'03] introduit une condition : la prise en main de l'outil ou l'interprétation des résultats ne nécessite pas d'expert.

⁴⁴ Dans cette partie : le terme « outils » réunit à la fois méthodes et outils

[Lindahl'06] définit une liste des attentes des ingénieurs vis-à-vis d'un outil d'éco-conception, selon les témoignages de douze concepteurs :

- il est facile et rapide de comprendre et de tirer les bénéfices de son utilisation. L'outil est intuitif, logique, facile à communiquer. L'effort d'utilisation doit être compensé par la qualité du service rendu. C'est d'autant plus vrai lorsqu'une formation préliminaire est requise ;
- il est facile de comprendre sa méthode ou son fonctionnement. Les utilisateurs préfèrent un outil simple qui ne nécessite pas de formation et recevoir ultérieurement de l'aide lorsque des questions/points bloquants se révèlent. Les utilisateurs préfèrent plusieurs outils simples, quitte à en choisir un seul, le plus utile et le plus adapté, plutôt que d'avoir un outil plus important dont la plupart des fonctionnalités ne sont pas utilisées ;
- l'outil est ajustable à différents contextes : il doit se fondre dans la culture de l'entreprise. L'intégration avec les outils existants est fortement souhaitée ;
- le temps de réappropriation après apprentissage est court. Un outil complexe doit pouvoir être utilisé très régulièrement de façon à ne pas oublier son mode de fonctionnement. Sinon, la nomination d'un « référent » dans l'équipe qui se charge de l'utilisation de l'outil et délivre les résultats à ses collègues est acceptable ;
- l'utilisation ne nécessite pas beaucoup de coopération. Cela permet d'éviter les problèmes liés à la coordination des tâches et des équipes ;
- les données d'entrée du système doivent être facilement accessibles et surtout on ne peut exiger des données d'entrée qui ne sont pas encore connues ;
- la visualisation des résultats est soignée et rend l'outil attractif ;
- l'outil est un outil informatique ;
- l'outil donne une direction et non le résultat dans les stades préliminaires de la conception et donne ensuite des résultats plus précis pour l'optimisation du produit.

2.2 Prérequis pour l'intégration d'un outil d'éco-conception

Les outils ont été développés après une étude approfondie des spécificités des concepteurs, de celles de l'entreprise et de l'ensemble du secteur microélectronique. Chacun de ces « acteurs » (individu, entreprise, secteurs) ont des attentes différentes vis-à-vis de la restitution des résultats. Il s'agit de lister, sans ordre d'importance, les éléments qui sont susceptibles d'intéresser au moins un de ces acteurs.

On commence par un état de l'art de la littérature et observe quelles informations sont généralement délivrées par les outils. Ces outils prennent des formes différentes selon le profil de l'utilisateur: ses besoins, sa sensibilité, sa capacité à intégrer de nouvelles contraintes. Une grande variété de techniques est disponible et les outils jouent alors sur les critères suivants : nature des informations délivrées aux concepteurs, format de restitution de ces résultats, schéma organisationnel pour l'utilisation de ces outils.

- Niveau concepteur

Une méthodologie centrée-utilisateur a été appliquée en considérant les spécificités de chaque concepteur, et plus particulièrement les données qu'il peut fournir dans les premiers stades du

développement. Un sondage d'opinion a permis de définir les résultats qu'il juge utiles et faciles à utiliser.

Pour chaque groupe de travail, et avant de figer ces critères, dans le cadre du processus de co-développement des outils, l'ensemble des techniques existantes a été montré aux ingénieurs. Leur sensibilisation initiale à ces pratiques était très faible, voire inexistante, exceptée pour les méthodes d'innovation comme TRIZ. La présentation des avantages, forces et inconvénients de chacune a été faite, la difficulté étant de ne pas imposer nos idées préconçues, ce qui aurait occasionné une perte de créativité. Une fois les techniques présentées, des séances de brainstorming et de discussions ouvertes ont permis de définir les prérequis de l'outil.

- Niveau entreprise et sectoriel

Concernant ces deux niveaux, les demandes et les attentes sont les mêmes : un benchmark a permis d'appréhender la maturité de la concurrence et des clients. Ces attentes ont été décrites aux concepteurs pour qu'ils en fassent eux-mêmes l'appropriation dans les outils et méthodes.

La société STMicroelectronics a annoncé « 100% de nouveaux produits éco-conçus en 2015 ». Cet objectif, annoncé immédiatement dans les groupes de travail, a contribué au fait que l'outil devra être utilisé de façon généralisée sur toutes les familles de produits : son utilisation ne sera pas seulement d'ordre volontaire mais aussi obligatoire à des moments ponctuels du processus de conception. Il s'agit de s'assurer que des actions d'éco-conception ont été menées et qu'on peut légitimement dire que les produits ont été développés selon un processus établi d'éco-conception. Les fonctions dirigeantes ont émis deux avertissements : utilisation peu contraignante pour l'ingénieur et mise en œuvre non exagérément consommatrice de ressources financières.

Les attentes du marché par rapport à la nature des informations et notamment les indicateurs ont été résumées dans la partie II. Par ailleurs, nous avons défini les attentes d'un point de vue sectoriel sur les indicateurs d'ACV nécessaires pour une analyse environnementale approfondie.

2.2.1 Critères organisationnels

- Structure de l'outil collaboratif

La première question soulevée dans les groupes de travail concernait l'articulation des outils entre les différentes équipes de conception. Un outil est transversal ou hiérarchique. Un outil dit transversal s'adapte aux différents niveaux du processus de conception : les résultats environnementaux sont connus de chaque concepteur et partagés entre les acteurs. Au contraire, un outil dit hiérarchique est dédié à un métier.

Par ailleurs, l'outil d'éco-conception peut être indépendant ou intégré à des outils déjà existants. Un outil supplémentaire peut être inefficace et il peut s'avérer que les considérations environnementales soient ajoutées dans des outils existants communément utilisés. Par exemple, les outils de CAO, Solidworks et CATIA, sont interfacés avec des modules intégrant des caractéristiques environnementales dans la conception de produits mécaniques.

Dans notre cas, la communication d'informations entre les différentes équipes est nécessaire pour dresser le profil environnemental complet d'un produit et il existe un nombre important de métiers travaillant en interaction sur le développement d'un même produit. Les concepteurs utilisent une grande variété d'outils, spécifique de leurs activités respectives. Ainsi, l'ajout de modules environnementaux dans plusieurs outils a été évoqué : simulation électrique (Cadence), TCAD (Technology Computer-Aided Design). Il s'agirait d'avoir un compteur qui simule en temps réel

l'impact environnemental de la conception : l'impact en fonction de la longueur du routage ou de la taille de la puce ou bien en fonction de l'épaisseur d'un matériau. L'idée n'a pas été validée dans le cadre de cette thèse car nous avons évalué que la valeur ajoutée d'intégrer de tels modules dans ces outils est faible par rapport à la difficulté d'implémentation : le besoin réel n'a en outre pas été directement formulé par les utilisateurs. L'avantage que nous voyons est d'éveiller la conscience de l'ingénieur sur l'impact environnemental de ses choix de conception mais aussi de cascader l'information environnementale aux demandeurs de la simulation. Une veille devrait permettre de vérifier que ces outils n'ont pas prévu d'intégrer prochainement ce type de modules.

De ces différents constats, il a été décidé d'avoir un outil transversal unique collaboratif où chaque acteur connaît les résultats des autres équipes, sans toutefois avoir des droits en écriture. De plus, chaque métier de la conception a son propre outil, adapté à ses spécificités: on a donc une segmentation sur plusieurs niveaux de l'outil.

La collaboration entre les équipes est nécessaire puisque les décisions de conception d'une équipe influent sur les impacts environnementaux d'une autre, d'où la nécessité de l'outil unique. Cependant, l'utilisateur est autonome et ne coopère pas avec un autre acteur. Par ailleurs, une plateforme unique dédiée à l'éco-conception a un rôle unificateur pour instituer l'éco-conception comme valeur de l'entreprise et donne une visibilité à l'ensemble des employés.

- Utilisation volontaire et étapes obligatoires

Bien que le co-développement garantisse des outils simples d'utilisation et s'inscrivant dans le processus de conception existant, aucun de ces éléments ne peut assurer que l'ingénieur utilisera l'outil. Au niveau de l'entreprise, il faut assurer que l'ensemble des produits est bien soumis à des processus d'éco-conception. La plupart des opérations sont réalisées sur la base du volontariat en misant sur la curiosité et la sensibilité de l'ingénieur, mais certaines autres sont nécessairement obligatoires. Elles sont inscrites dans les procédures internes de développement de nouveaux produits : d'une part, la description de l'utilisation des outils est standardisée et des procédures sont écrites pour en montrer l'utilisation « normale » et d'autre part, des livrables sont rendus à des étapes-clé du développement restituant des éléments environnementaux qualitatifs ou quantitatifs. Ces livrables prouvent le bien-fondé de l'intégration de l'éco-conception dans le processus de développement des outils.

Les contraintes des concepteurs ont été soigneusement évaluées pour être conformes à leurs tâches quotidiennes. Une méthodologie d'éco-conception peut être systématisée dans les tâches quotidiennes des concepteurs si et seulement si son utilisation n'introduit pas de contraintes déraisonnables sur la charge de travail: le temps alloué à cette nouvelle tâche doit être mineur.

2.2.2 Nature des informations à mettre à disposition des concepteurs

- Règlementation

La mise en conformité des produits avec les législations en vigueur est bien entendu une obligation pour l'entreprise. Les processus de mise en conformité peuvent être très lourds pour les équipes de conception. Notamment, l'élimination du plomb dans les soudures a été un énorme challenge technique qui a été à l'origine du dépôt de plusieurs brevets. L'éco-conception s'avère être un moyen de mieux anticiper les législations et ainsi donner plus de temps aux concepteurs pour trouver des actions de correction et de mise en conformité.

Le produit microélectronique doit être en conformité avec plusieurs réglementations relatives à des critères EHS. De façon générale, une entreprise doit démontrer à ses clients la mise en conformité des produits avec les réglementations en vigueur : des livrables obligatoires, rendus à des stades-clé du développement, pourront donner des éléments de preuve. Les outils peuvent faciliter la génération de ces preuves. Toute information relative à la mise en conformité et l'anticipation des réglementations est pertinente.

Il y a deux niveaux d'informations : substances et énergie. Une traçabilité sur les substances utilisées permet d'alerter le concepteur sur l'utilisation de substances si elles sont bannies, dangereuses ou soumises à des forts risques, selon la directive RoHS. Dans des processus d'éco-conception, des listes de substances sont utilisées pour guider le concepteur mais aussi pour certifier au client la non-utilisation de ces substances grâce à la mise en place d'un système de traçabilité. La prise en compte du risque chimique du fait de la fabrication, par la traçabilité et la déclaration de l'ensemble des agents chimiques pour être en conformité avec REACH, pourrait être intégrée dans la méthodologie. A ce stade du développement, ce volet n'a pas été abordé mais reste un pan d'exploration pour l'entreprise en réponse au problème de traçabilité des substances sur le cycle de vie d'un produit.

La délivrance systématique d'un certificat de conformité, la «material declaration»⁴⁵, est obligatoire pour tous les produits mis sur le marché. Ce document certifie la non-présence des substances bannies par la directive RoHS dans la composition des produits. Tout changement qui impacte la composition et le contenu en substances dangereuses est communiqué. La rédaction de ce certificat a nécessité la mise en place de processus internes et de ressources humaines et matérielles dans l'entreprise. Le recours à des outils PLM exploitant la BOM permettrait l'édition automatique du certificat.

Pour le niveau « énergie », la directive ErP, ainsi que des normes spécifiques à certains produits décrites dans la partie I, donnent des seuils de consommation pour les composants ; ces seuils ne sont pas utiles aux concepteurs en tant que données d'entrée car ils les connaissent mais l'inclusion de cet aspect énergétique est primordiale dans la communication au client.

- Diffusion de la culture d'éco-conception dans l'entreprise

Pour [Boks'06], la communication et la coopération sont des facteurs primordiaux pour la diffusion de la culture de l'éco-conception. Les futurs utilisateurs de l'outil n'ont jamais été jusqu'alors sensibilisés à la thématique : la formation des ingénieurs est un prérequis pour la mise en place de pratiques d'éco-conception. La sensibilisation et la formation des concepteurs sont donc des leviers de la propagation de l'éco-conception dans une entreprise [LePochat'05].

Outre des formations lors de l'installation des outils, des formations seront disponibles pour informer sur les principes de base (concepts, lexiques) et l'ACV (indicateurs, base de données utilisées, méthode d'ICV), par le biais de formation en ligne communément utilisées dans l'entreprise sur des thématiques diverses.

⁴⁵ L'alliance des industries électroniques (EIA) a développé un guide pour les material declarations. Ce guide, basé sur les législations existantes et à venir ainsi que sur l'engagement volontaire des industries, propose un format uniforme pour les fabricants. Des outils permettent de délivrer ce certificat : Product/Process Change Notification (PCN), Production Information Letter (PIL), Application Note (AN).

Par ailleurs, les messages donnés par les fonctions dirigeantes peuvent être très forts si des objectifs en termes de performances environnementales sont demandés aux concepteurs

- [*Plateforme collaborative et banque d'exemples*](#)

De nombreuses idées préconçues existent en général sur les problématiques environnementales dans l'industrie microélectronique. Etant donnée la séparation entre conception et fabrication, les concepteurs n'ont souvent pas conscience de la pollution générée par les produits.

Une banque d'exemples présentant des cas d'études permet de lutter contre les clichés et de prouver que l'industrie microélectronique ne peut plus répondre aux sollicitations extérieures (clients, actionnaires, agences de notation, etc.) uniquement par le biais de ses feuilles de route.

Par ailleurs, la connaissance des impacts environnementaux des produits et procédés est faible car les possibilités qu'offrent les ACV sont méconnues des concepteurs. Les études présentées sont les premiers « chiffres » transcrivant les performances de produits. La mise en place d'une banque d'exemples montre le spectre de résultats qui peut être obtenu et ouvre les concepteurs à de nouvelles pratiques où l'on peut mesurer l'impact environnemental des décisions en conception.

La banque d'exemples a une autre utilité sur des communautés plus restreintes : la mise en commun et le partage de bonnes pratiques via un réseau d'informations. Un forum permet de connaître et d'identifier des pratiques mises au point par une équipe et de les partager à l'ensemble des équipes qui pourraient être concernées par cette solution. La communication entre les sites est souvent limitée surtout lorsqu'il s'agit de pratiques environnementales. Un exemple ayant permis de réduire l'impact sur l'environnement est une information concrète dont les concepteurs souhaiteraient disposer pour améliorer l'impact de leurs propres activités.

Cette banque d'exemples et la communication des bonnes pratiques entre des communautés de concepteurs seront abritées sur une plateforme d'échanges collaborative : c'est un espace commun consultable sur l'intranet réunissant sur des sujets environnementaux des utilisateurs dont les centres de recherche sont communs. Il s'agit d'étendre les réseaux de travail à l'ensemble des sites et concentrer les efforts sur le sujet de la réduction des impacts environnementaux.

- [*Guidelines : Lignes directrices pour l'amélioration environnementale*](#)

De façon générale, une guideline est une indication utilisée pour déterminer une future ligne de conduite. Selon [Bischoff'08], leur utilisation lors de la conception rend « [...] the result of the activities of the designers more predictable and [...] presumptively improve the results ». [Vezzoli'06] combine ces deux concepts, en définissant les guidelines comme « procedures to orient a decision process towards given objectives ».

On trouve deux types de guidelines. Avant une décision en conception, les guidelines d'anticipation donnent une liste de stratégies prometteuses. Après un choix, les guidelines de vérification permettent de prouver la convergence des actions vers un objectif défini.

Des guidelines génériques sont pertinentes pour un large éventail de situations [Luttrupp'06] car elles sont transposables. Elles sont également utiles dans les phases de 'Conceptual Design' car elles sont compréhensibles par des équipes pluridisciplinaires, sans connaissance des détails techniques. Cependant, bien que ces guidelines génériques permettent de découvrir des interprétations créatives, il est plus efficace dans le travail quotidien du concepteur d'utiliser des guidelines qui lui sont plus personnelles: plus une guideline est spécifique, plus elle est utilisée efficacement par les

concepteurs [Vezzoli'06], [Dahlström'99]. En outre, la pertinence des lignes directrices peut être dépendante du produit étudié [Vezzoli'06].

Pour définir un ensemble de guidelines approprié aux concepteurs de composants microélectroniques, nous avons étudié des guidelines existantes et déjà utilisées en industrie afin de les adapter à notre contexte spécifique. Il s'agit alors de définir la pertinence d'une guideline et ensuite d'identifier l'acteur concerné et le moment de la conception où elle s'appliquera. Une fois présenté le concept des guidelines aux groupes de travail, nous avons pu conclure que les deux types de guidelines, anticipation et vérification, peuvent être utilisés selon le stade de la conception.

- *Indicateurs d'ACV*

Les contraintes environnementales sont souvent couplées dans des méthodes d'aide à la prise de décision avec des considérations économiques ou de qualité. Les critères économiques sont quelquefois les seuls informations et indicateurs de sortie [Brezet'97-b]. Ces critères ont intéressé certaines personnes interrogées (groupe de travail et fonctions dirigeantes). Pourtant, il y a eu un choix délibéré de notre part et de celle de la majorité des concepteurs d'exclure toute autre considération que celle environnementale pour une meilleure lisibilité des résultats. En effet, comme expliqué dans le chapitre 7, la connaissance des impacts environnementaux des produits est faible dans l'industrie en général et peut-être encore plus en microélectronique. Alors, de ce point de vue, le déploiement de méthodes de mesure d'impacts avec une méthodologie d'ACV en conception a double emploi : effectivement comme le prévoit l'éco-conception, baisser l'empreinte des produits mais aussi sensibiliser l'entreprise à des indicateurs environnementaux.

Les résultats d'une analyse environnementale peuvent être exprimés selon un ou plusieurs indicateurs. La force de l'ACV est l'évaluation multicritère par la mesure des performances sur chaque catégorie d'impact et l'observation des transferts potentiels. Cependant, manipuler plusieurs critères augmente la charge de travail du concepteur, complexifie sa tâche et ralentit la prise de décision. Dans quelques cas, l'utilisation d'un critère unique est plus pertinente et très largement appréciée des concepteurs.

La plupart des acteurs du secteur aujourd'hui ont une communication environnementale centrée sur les émissions de carbone générées par le produit⁴⁶. Cette communication sur la base d'un seul critère n'est pas satisfaisante et l'utilisation de plusieurs catégories d'impacts est un prérequis, les critères étant ceux définis dans le chapitre 7.

Même si elle est sujette à discussion entre les scientifiques, une demande très forte a été émise par les groupes de travail vis-à-vis d'une normalisation et d'une note unique. Bien que nous ayons veillé à exprimer pourquoi la normalisation a des effets négatifs et en quoi elle peut mener à de mauvaises interprétations, les concepteurs ont insisté sur le fait de garder certes d'un côté les différents impacts environnementaux mais d'avoir de l'autre côté, l'information globale, via le score unique présenté dans le chapitre 8, pour pouvoir aisément comparer les impacts environnementaux de deux objets.

⁴⁶ Des entreprises comme Samsung, AMD, Keita ou Sanyo présente sur leur site internet ce type de profil

2.2.3 Formats de restitution des résultats

Les différentes informations sont restituées aux concepteurs et à leur chef de projet. Les informations peuvent être données ponctuellement au concepteur indépendamment du temps ou au contraire à des moments précis du processus de conception.

- Délivrer un profil-produit

Ce document unique est en fait le profil environnemental du produit : il comprend la 'material declaration', les informations réglementaires (consommation d'énergie pour EuP, substances bannies pour RoHS) et les performances du produit sur son cycle de vie selon des indicateurs présélectionnés.

De nombreuses entreprises du secteur électrique et électronique ont déjà mis en place ce type de profil (Schneider, Apple, Samsung, etc.). La principale difficulté, à ce stade, est liée à la certification des informations données au client lors de la vente d'un produit. Les documents, comme la 'material declaration', sont contractuels et ainsi le fabricant s'engage sur la véracité des données communiquées notamment grâce à la validation par un tiers indépendant. Des informations de type ACV sont aujourd'hui difficilement certifiables, et d'autant plus avec une ACV-simplifiée. Les profils-produit délivrés par les entreprises sont généralement des auto-déclarations, ce qui a tendance à décrédibiliser la publication d'informations environnementales.

- Rendre obligatoire certaines opérations et la restitution de leurs résultats

Comme nous l'avons dit précédemment, certains résultats environnementaux extraits de la plateforme doivent être obligatoirement délivrés : on s'en assure en demandant systématiquement de renseigner une checklist à des moments-clé de la conception (Figure 34).

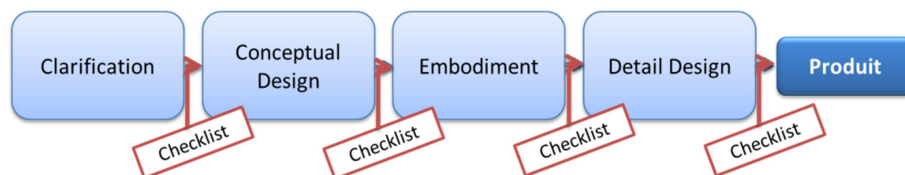


Figure 34 : Checklists validant le passage entre les phases de conception

La checklist est un document standardisé listant les livrables et indicateurs qui doivent être remis pour passer au prochain stade de développement. La checklist est remplie par le concepteur à chaque transition de phases de conception, de façon obligatoire et systématique. Ce principe de checklist aux phases transitoires est déjà largement répandu dans les entreprises pour des critères de coût, qualité et performances ce qui permet de comparer des objets développés par des équipes différentes sur les mêmes critères. La nouveauté est donc d'y intégrer des critères environnementaux. [de Caluwe'04] présente une « Maturity Grid » utilisée par Philips : cette grille reprend les principes du management de la qualité pour intégrer l'éco-conception.

Les checklists sont inscrites dans les schémas organisationnels et dans les processus internes de développement de nouveaux produits. Le fait d'institutionnaliser les pratiques de l'éco-conception dans ces checklists a certes l'avantage de mesurer les progrès d'un produit par rapport à la génération précédente, mais permet surtout de s'assurer que les aspects environnementaux ont été considérés et donc favorise la propagation des principes.

- Donner des informations visuelles et facilement compréhensibles

Les informations à fournir aux concepteurs sont, on l'a vu, de nature diverse. De plus, le processus de développement d'un objet étant très complexe, l'information doit être fournie avec parcimonie afin de ne pas accabler le concepteur de renseignements inutiles et inutilisables.

L'idée des groupes de travail est de travailler avec des indicateurs visuels et homogènes entre les différentes parties de l'outil. Une charte graphique, comprenant des logos et des codes-couleur, permet l'identification d'éléments significatifs. Des logos clignotants, appelés « warnings », pendant les séances des groupes de travail donnent l'information en temps réel si une substance bannie, nocive ou très polluante, présente sur une liste de substances, est utilisée. En suivant une même charte graphique, les études de la banque d'exemples et toute communication dans le cadre de la sensibilisation, sont facilement identifiées et leur lecture est en facilitée.

- Développement informatique d'outils prototypes

Le cahier des charges fonctionnel est traduit en cahier des charges technique par des informaticiens. Puisque les outils doivent être développés à l'ensemble des sites de l'entreprise, il faut s'assurer que certains standards informatiques soient respectés.

Certaines fonctionnalités prévues par le cahier des charges ont dû être revues. Les systèmes informatiques de l'entreprise, particulièrement ceux de gestion du parc des équipements de production, sont complexes et peu susceptibles d'évoluer rapidement. De plus, les usines ne sont pas équipées de la même manière en termes d'infrastructures d'automatisation de la zone de production. Bien que la version prototype des outils n'ait pu intégrer toutes les demandes du cahier des charges fonctionnel, une évaluation financière a été réalisée pour planifier les potentielles évolutions des outils informatiques.

En conclusion, le développement informatique est soumis à des contraintes non envisagées par le cahier des charges fonctionnel. L'intégration d'informaticiens au groupe de travail aurait permis d'intégrer cette difficulté mais aurait pu représenter une barrière à la créativité.

3 Synthèse : Cahier des charges d'une méthodologie d'éco-conception pour le secteur microélectronique

Grâce à l'état des lieux dressé dans les deux précédentes sections, nous avons répertorié les attentes du marché, de l'entreprise et des individus vis-à-vis des résultats délivrés par les outils et de l'organisation associée. Dans cette partie, nous veillerons à donner un cahier des charges précis de la méthodologie pour une entreprise microélectronique.

3.1 Objectifs stratégiques de la méthodologie

La Figure 35 présente les objectifs de la méthodologie selon les différentes phases de la conception. Cette section synthétise les résultats souhaités pendant la conception en fonction des outils et méthodes les délivrant.

La méthodologie globale s'inscrit dans une stratégie industrielle menant à une politique intégrée des produits couvrant l'ensemble des nouveaux produits. Les objectifs de la méthodologie d'éco-conception sont au nombre de quatre :

- mesurer systématiquement les performances des produits à des stades précis de la conception pour dresser le profil environnemental d'un produit ;
- amener au concepteur une aide à la décision en l'incitant à prendre des décisions en faveur de l'environnement ou au moins en lui ayant donné les informations nécessaires à une prise de décision qui irait en faveur de l'environnement ;
- sensibiliser le concepteur à l'utilisation et la mise en pratique d'une démarche d'éco-conception ;
- assurer la conformité du produit vis-à-vis des réglementations en vigueur .

Les outils et méthodes doivent répondre à ces objectifs en apportant une valeur ajoutée dans le développement du produit : re-conception du produit, diminution des impacts, application de procédures d'éco-conception. Tous les outils devront favoriser au moins un de ces quatre axes.

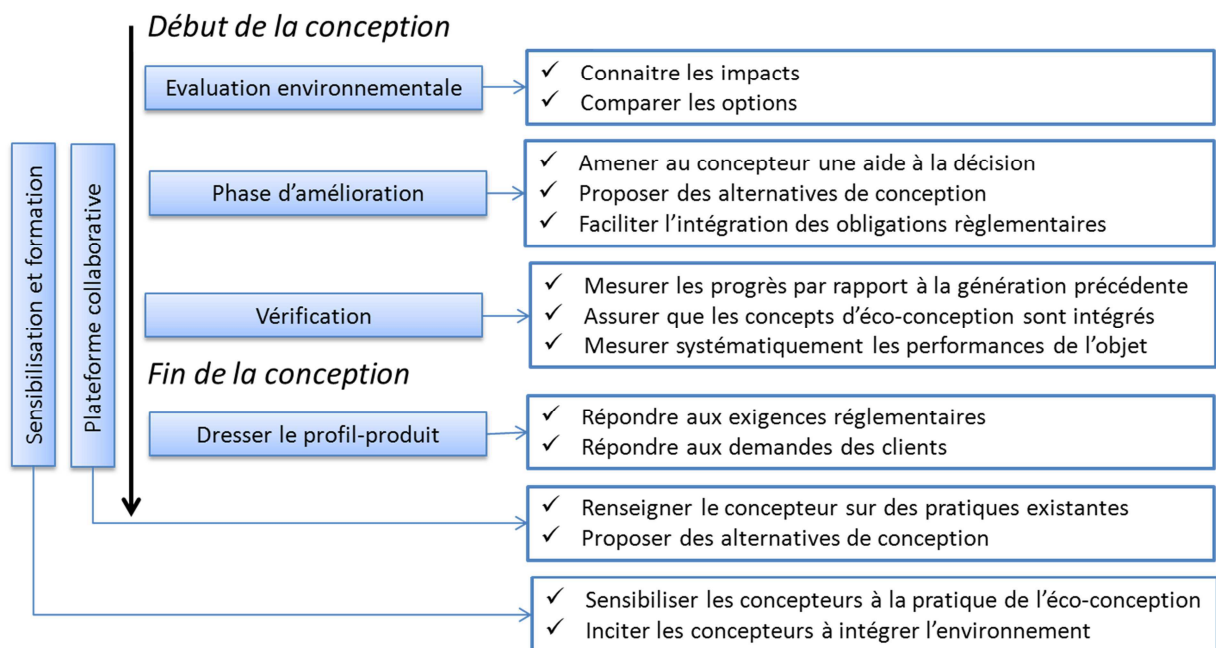


Figure 35 : Objectifs de la méthodologie d'éco-conception

3.2 Outils et méthodes utilisés

3.2.1. Amélioration environnementale par l'ACV

La méthodologie d'ACV est utilisée à plusieurs fins.

- la mesure des performances absolues n'est pas en soi exploitable mais elle montre au concepteur que chaque décision prise pendant le développement est susceptible d'avoir un effet environnemental ;
- la mesure des performances relatives d'une génération de produit à une autre permet de limiter les impacts environnementaux d'un nouveau produit par rapport au(x) produit(s) dont sa conception est inspirée ;
- la mise en avant des points faibles d'un produit permet d'identifier les principaux bras de levier. L'identification des éléments les plus polluants ou remarquables est ainsi une aide à la conception car elle oriente le concepteur dans la (re)conception d'un ensemble pour

éliminer un de ces éléments. Un tel élément peut être une phase du cycle de vie, une option du produit, un processus de fabrication, un alliage de matériaux, une substance dangereuse etc. ;

- des suggestions et recommandations pour l'amélioration des performances sont des aides à la conception et orientent celle-ci tandis que des résultats quantitatifs permettent de noter l'amélioration qui sera induite par une décision en conception. Ces suggestions sous la forme de guidelines d'anticipation ou de vérification, sont des informations qualitatives permettant de guider la conception, qui doivent être pertinentes pour un acteur et à un moment donné de la conception. Elles donnent des alternatives à des éléments polluants.

Les résultats d'ACV sont restitués aux concepteurs, indépendamment du temps ou au contraire à des moments précis du processus de conception. L'analyse environnementale permet de répondre aux demandes des clients relatives aux performances des produits vendus. Le profil du produit est donc fourni avec des informations relatives aux impacts environnementaux et à la mise en conformité par rapport aux législations en vigueur.

3.2.2 Diffusion de la culture d'éco-conception dans l'entreprise

Certains outils ont pour but de sensibiliser et renseigner les concepteurs sur les moyens de baisser l'impact de la conception. La méthodologie intègre donc des outils de formation en ligne, des présentations des principes de l'éco-conception et une banque d'exemples qui reprend des cas d'études. Des objectifs stratégiques sont donnés au début de la conception, ainsi qu'un système de guidelines orientant le concepteur s'il veut baisser l'impact environnemental de l'objet en conception. Une plateforme de collaboration informe le concepteur des bonnes pratiques. Finalement un système de veille réglementaire à l'échelle de l'entreprise assure la conformité des produits et permet l'anticipation des réglementations.

Alors que la plupart des opérations sont réalisées sur la base du volontariat, certaines informations doivent être obligatoirement délivrées aux concepteurs et cascadées à leur hiérarchie par le biais de checklists. Les livrables regroupent des informations de natures différentes : réglementaire, indicateurs d'ACV et scores uniques. Les informations quantifiées seront utilisées pour identifier les points faibles du nouvel objet et le comparer à la génération précédente. Certains points méthodologiques sont relatifs à l'utilisation de l'outil et prouvent que les outils ont bien été utilisés dans le processus de développement. D'autres points sont de l'ordre de la gestion de projet comme l'établissement d'un plan d'action pour réduire les principaux impacts.

3.3 Synthèse des attentes des utilisateurs vis à vis des supports méthodologiques

Le Tableau 41 résume les principaux leviers que nous avons considérés pendant le développement pour favoriser la pérennisation de l'outil. La mise en application ou au moins la prise en compte de tous les items, même s'ils ne sont pas à proprement parler des règles strictes, permet d'optimiser les chances que l'outil soit utilisé et accepté par les ingénieurs.

Tableau 41 : Leviers pour l'intégration d'un outil d'éco-conception

Leviers	Items détaillés des attentes des utilisateurs
Acceptation par les équipes de conception	Facile de comprendre le fonctionnement [Lindahl'06] Contient de l'information et stimuli [Lofthouse'06] Permet une bonne visualisation des résultats [Lofthouse'06] Informations fournies et communiquées avec parcimonie*
Aval des équipes dirigeantes	Facile de comprendre les objectifs* La prise en main de l'outil ne nécessite pas d'expert [Le Pochat'03] L'interprétation des résultats ne nécessite pas d'expert [Le Pochat'03]
Cohérence dans le processus de conception	Ne nécessite pas beaucoup de coopération [Lindahl'06] Restitution de résultats adaptés au stade de la conception [Lindahl'06] Adapté au langage de l'entreprise [Lofthouse'06] Information homogènes entre les différentes parties de l'outil*
Minimisation du temps, et de l'effort à fournir pour son utilisation	Temps appropriation court [Lindahl'06] Accessibilité des données d'entrée [Lindahl'06] Est accessible en termes de contraintes de temps [Lofthouse'06] Un service facile [Lofthouse'06] Informations visuelles, facilement compréhensibles et exploitables*
Possibilité de duplication à l'ensemble des sites	Outil informatique [Lindahl'06] Ajustable [Lindahl'06] Utilisant des standards informatiques communs à tous les sites*

*attentes supplémentaires formulées par les groupes de travail

4 Schéma de la méthodologie d'éco-conception intégrée à la plateforme Green-ST

Les outils et méthodes, supports de la méthodologie, sont embarqués dans une plateforme unique *Green-ST* : c'est un outil transversal, unique et collaboratif, entièrement dédié à l'éco-conception. Dans cette section, avant de présenter le schéma de la méthodologie, les principes utilisés dans la plateforme pour l'évaluation environnementale sont décrits.

4.1 Principes utilisés pour déterminer les impacts d'objets en conception

4.1.1 Utilisation de modèles paramétriques

L'ACV-simplifiée est basée sur le principe que l'on peut déduire les données de l'ICV d'un objet à partir de modèles simplifiés. L'évaluation des impacts est basée sur des relations mathématiques entre paramètres ou fonctions du produit et impacts environnementaux. L'empreinte environnementale d'un objet est calculée à partir d'un faible nombre de paramètres. Selon [Verghese'10] et [Horne'09], le recours à cette méthode, moins consommatrice de temps, s'avère assez courant et apprécié par les équipes de conception. Il permet de s'affranchir de l'aide systématique d'un expert en ACV.

Les paramètres, choisis par le concepteur lui-même, correspondent à des données usuellement manipulées et donc qui lui sont bien connues ou aisément retrouvables dans des documents techniques. Dans notre modèle, ces paramètres correspondent aux KP définis dans le chapitre 9. Les fonctions faisant varier les flux physiques de l'ICV (énergie, consommation de matières premières,

émissions, déchets) sont définies avec des modèles paramétriques sur les unités de production. Ces modèles sont intégrés dans les outils à la fois pour anticiper sur les impacts d'objets dont les paramètres de conception ne sont pas encore figés et pour réduire le temps de mise en œuvre de l'analyse environnementale en marge des ACV complètes. L'objectif est d'orienter, dès la phase de conception conceptuelle, la réflexion vers les meilleures solutions environnementales [Kaebernick'00] [Dewulf'03]. Il suffit de faire appel aux relations mathématiques donnant les impacts environnementaux en fonction de paramètres du produit pour identifier très tôt dans le processus de conception les futurs impacts potentiels du produit. Pour [Jeswiet'05], les chances de réduire les impacts augmentent lorsque l'ACV est réalisée pendant la conception.

Toutefois, la modélisation d'un objet au travers d'un nombre réduit de paramètres, est forcément liée à certaines hypothèses et approximations. De plus, on trouve deux principaux problèmes aux méthodes d'évaluation paramétrique : leur création nécessite des ACV complets pour créer les référentiels de données paramétrées indispensables à l'élaboration des modèles et leur champ d'exploitation est limité aux types de produits pour lesquels ils ont été construits.

4.1.2 Construction du modèle d'un produit par analogie

Afin d'analyser les performances d'un produit quelconque, y compris en développement, la modélisation du cycle de vie doit être établie : on parle de « Life Cycle Modeling ».

Nous prenons une hypothèse simplificatrice : il n'existe pas de conception radicale dans les pratiques industrielles de l'entreprise mais la conception est faite par analogie. Un objet est développé selon des exigences nouvelles non remplies par les générations précédentes : performances accrues (électriques, mécaniques), structures différentes (nouvelle cellule, dimensions critiques réduites). Pourtant, les sauts technologiques ne concernent pas l'ensemble de l'objet : certes des techniques et structures sont élaborées sur certaines parties de l'objet mais aussi les concepteurs réalisent des améliorations mineures ou des ajustements et conservent des pans entiers de l'objet. On définit ainsi la notion « d'objet-parent » : il s'agit d'un objet d'une génération précédente en industrialisation pour lequel une ACV a été réalisée et avec lequel le nouvel objet partage des propriétés.

On l'a vu dans le chapitre 9, n'importe quel produit peut être décrit par un ensemble de paramètres-clé sur différents niveaux d'abstraction, les KP-Lx. Dans ce contexte, un produit en cours de conception est descriptible par ces mêmes paramètres, même si la plupart n'est pas encore figée. Par similitude avec un objet-parent, le modèle d'un objet en conception est construit par analogie. Sur les différents niveaux des paramètres du modèle d'un objet, il peut y avoir plusieurs cas d'analogies, reportés sur la Figure 36:

1. le paramètre-clé est strictement équivalent sur l'ensemble des niveaux d'abstraction ;
2. la structure du paramètre-clé est équivalente à celle d'un autre sur l'ensemble des niveaux d'abstraction mais les paramètres de niveaux inférieurs divergent et sont issus de plusieurs objets-parent ;
3. bien que le paramètre-clé soit inspiré directement d'un autre, leurs structures sont différentes sur l'ensemble des niveaux d'abstraction et les paramètres de niveaux inférieurs sont inspirés de plusieurs objets-parent.

La Figure 36 représente de façon schématique la description par analogie d'un nouvel objet A en fonction de ses objets-parent X, Y et Z, ici sur les niveaux 1 et 2, et présentant les différents cas d'analogie. Les résultats d'ACV sur des objets finis sont stockés dans une base de données ainsi que les impacts environnementaux en fonction des paramètres-clé de conception aux différents niveaux d'abstraction. Les concepteurs utilisent ultérieurement ces données pour prédire les impacts d'un nouvel objet à partir des impacts des différents objets-parent.

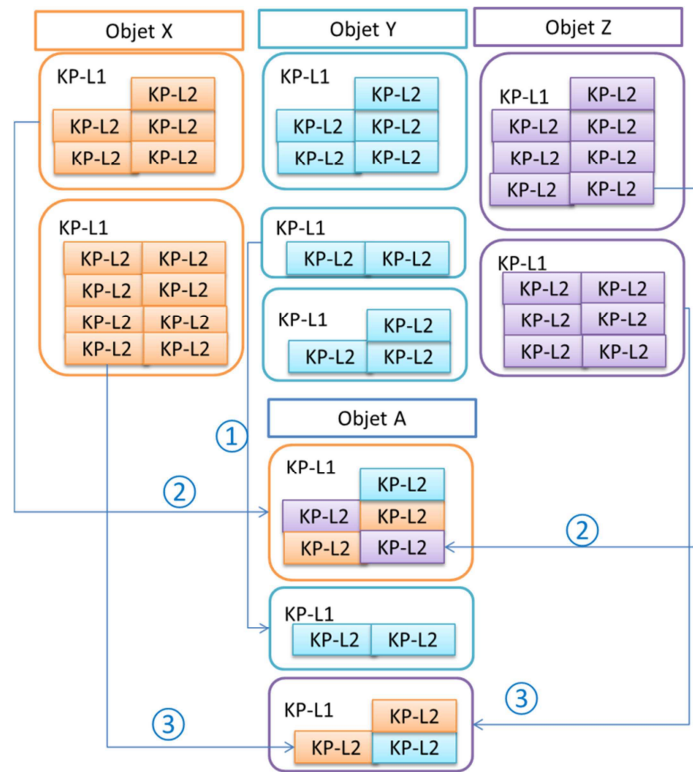


Figure 36 : Modélisation du cycle de vie d'un objet en conception par analogie

4.1.3 ACV-simplifiée : couplage des deux approches

N'importe quel objet en conception peut être décrit par son concepteur grâce aux éléments (procédés, matériaux associés à des modèles paramétriques, scénarii d'utilisation etc.), issus des générations précédentes.. On réalise un couplage entre la prédiction des impacts par l'utilisation de modèles paramétriques et la conception par analogie (Figure 37) : on appellera par la suite « ACV-simplifiée » cette méthode d'analyse, exploitant des résultats d'ACV.

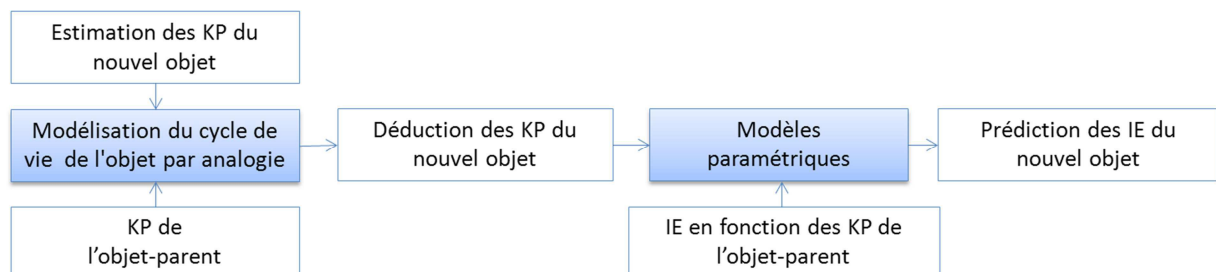


Figure 37 : Utilisation de l'ACV-simplifiée pour prédire les impacts d'un nouvel objet

Cette approche est cohérente avec des résultats de la littérature : [Somani'06] a élaboré des modèles paramétriques pour prédire les impacts environnementaux d'une nouvelle structure, un

module de « wafer bonding », spécifique de technologies semi-conductrices. Murphy met en avant le besoin de créer des modules paramétriques génériques et flexibles pour décrire l'inventaire du cycle de vie de la fabrication d'une plaquette [Murphy'03-a] [Murphy'03-b]. Ces modules ont pour but de calculer lors d'un changement technologique la consommation d'énergie et les émissions générées par la fabrication de la plaquette. Ils aident à prédire les changements dans l'ICV dus aux choix de conception ou d'équipement ou d'une modification dans la route de fabrication.

Nous avons donc créé des modules de prédiction des impacts environnementaux d'un produit à plusieurs niveaux : circuit, boîtier, technologie, procédés d'assemblage. Par manque de temps, nous n'avons pas exploré cette approche pour les procédés de traitement de la plaquette de silicium. En revanche, de tels modèles ont été développés pour les procédés d'assemblage du boîtier car les processus mis en jeu sont des procédés mécaniques classiques et que leur nombre est restreint.

4.2 Modification du déroulement de la conception et nouveau processus de développement d'un produit

Comme on l'a vu dans le chapitre 4, la conception d'un produit est un mécanisme non-linéaire : les échanges entre les concepteurs sont nombreux. Afin d'optimiser l'intégration des principes d'éco-conception, les contraintes de conception collaborative résultant des relations entre les équipes doivent être prises en compte. L'intégration d'informations « cycle de vie » pendant les stades préliminaires de la conception conduit à des phases-clé dans la gestion du projet.

L'utilisation systématique de nouveaux outils et méthodes a pour effet de modifier le processus de développement suivi par les concepteurs. Quelle que soit la phase de conception, des changements, évolutions, ou améliorations peuvent être apportés à l'objet en développement. Les informations données au concepteur lui permettent d'envisager des modifications mais il devra les contrebalancer aux influences qu'elles auront sur les autres critères de conception (coût, fiabilité, performances, etc.). Les résultats sont intégrés dans le processus de prise de décision pendant le développement de nouveaux objets : cela rajoute des phases d'analyse et de test pour la qualification de nouvelles conceptions. Ces phases sont plus ou moins longues selon le moment de la conception et la nature du changement. Les outils de formation et de sensibilisation qui peuvent être utilisés à n'importe quel moment de la conception ne sont pas représentés sur cette figure car ils correspondent à la diffusion de la culture de l'éco-conception et n'interviennent pas dans le processus d'éco-conception d'un objet en particulier.

Les Figure 38 et Figure 39 présentent schématiquement les étapes, obligatoires ou non, de l'utilisation de la plateforme pour les grandes phases de conception d'un produit et pendant la production. Les tâches (en rouge dans les figures) sont réalisées grâce aux outils et méthodes présentés précédemment (en vert) : ACV et ACV-simplifiée, orientation de la conception par des objectifs stratégiques, checklists, guidelines, plateforme de collaboration et un système de veille réglementaire. Chacun donne différents types de résultats qui seront intégrés dans le processus de conception. Des résultats environnementaux sont délivrés lors des revues de conception : les performances des composants sont mesurées, contrôlées et tendent à être améliorées. L'évolution par rapport aux précédentes générations est étudiée en détails afin d'assurer les bases d'un processus d'amélioration continue. En fin de conception, une dernière phase consiste à éditer le profil-produit en réponse aux clients.

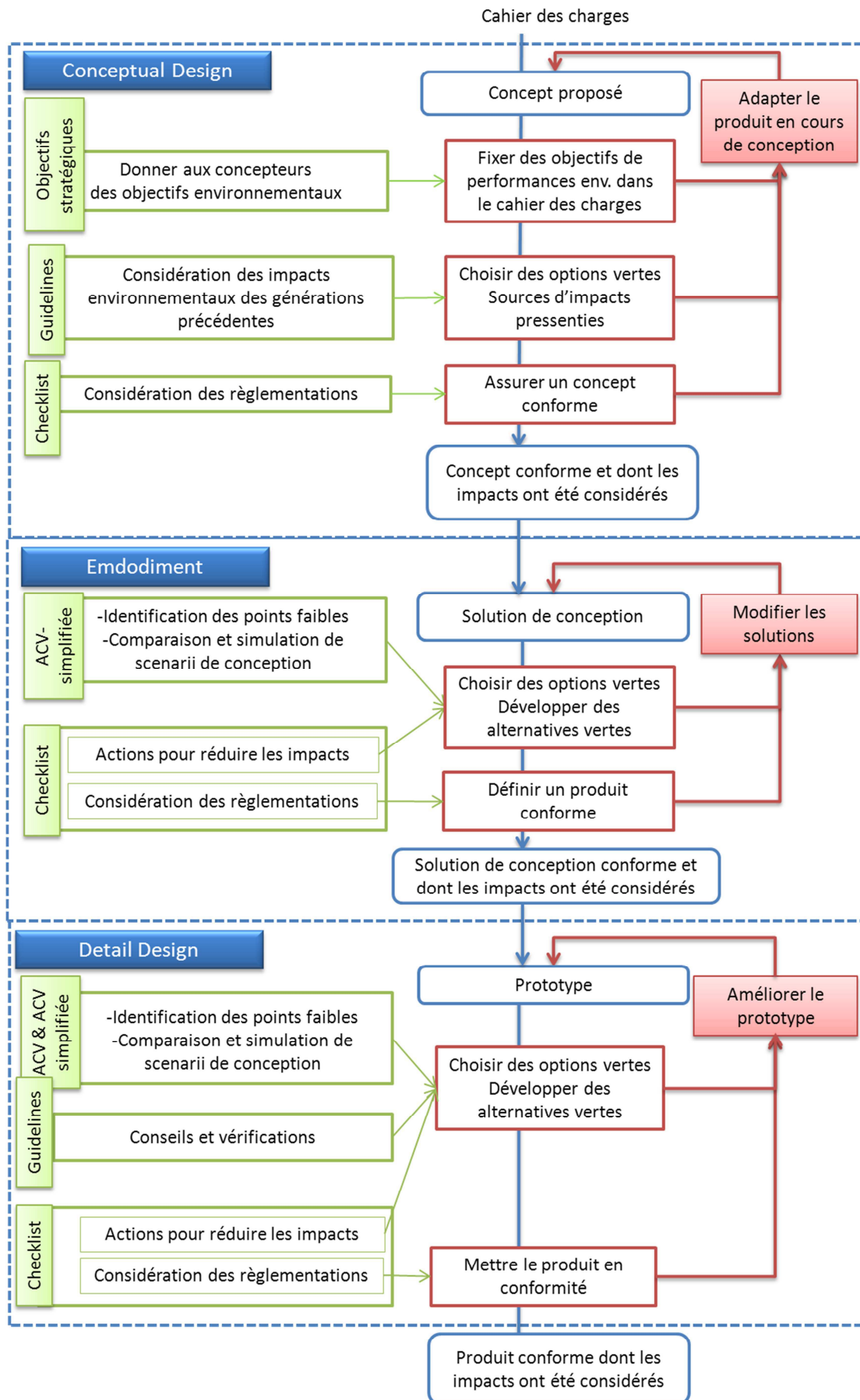


Figure 38 : Processus de conception et utilisation de la plateforme d'éco-conception

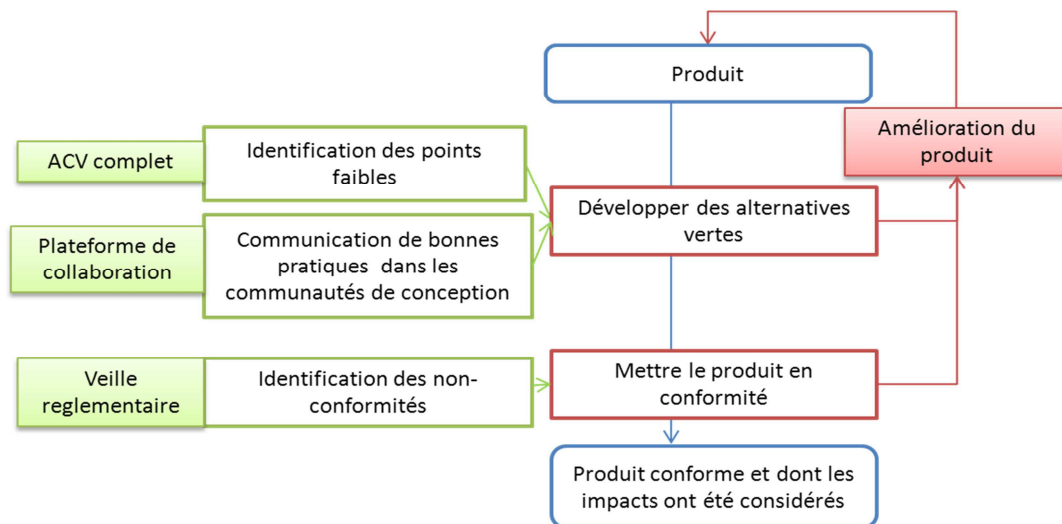


Figure 39 : Utilisation de la plateforme d'éco-conception sur un produit industrialisé

4.3 Cadre de la méthodologie

Les utilisateurs des outils sont les concepteurs eux-mêmes, tandis que les ACV (pour les profils-produit et la construction des modèles paramétriques) pourront être réalisées par des ressources spécifiques intégrées ou non aux équipes de développement. Une politique d'éco-conception doit prendre en compte la complexité du schéma de prise de décision : la méthodologie telle qu'elle est élaborée correspond à une optimisation des performances environnementales selon plusieurs critères et avec une approche pluridisciplinaire. Les principales équipes ont été décrites comme suit dans le chapitre 4 :

- le concepteur du circuit : définit le cahier des charges du circuit;
- le designer du circuit électrique : conçoit le circuit électrique;
- le designer de kit de librairies: conçoit des bibliothèques de composants élémentaires;
- le technologue et l'ingénieur R&D : conçoivent la technologie de fabrication de la puce ;
- l'ingénieur-procédé R&D : imagine les procédés de fabrication;
- le concepteur du boîtier : imagine la structure du boîtier et la technique d'assemblage ;
- le technologue de R&D avancée : met au point des techniques avancées de fabrication ;
- l'ingénieur-procédé des équipes de production.

La méthodologie est un support dans les prises de décision : elle aide les concepteurs à développer des produits innovants et à assurer de bonnes performances environnementales des produits, en suivant et mesurant les paramètres durant la conception ce qui évite les transferts. La problématique est d'identifier les interactions pluridisciplinaires pendant le pilotage du projet. Comme défini dans le chapitre 9, un produit est considéré tour à tour selon des niveaux d'abstraction : dans la méthodologie proposée, le concepteur a la possibilité de considérer le produit ou ses objets selon le stade de la conception ou son propre positionnement dans l'équipe-projet en utilisant le niveau de KL-Lx approprié.

De plus, chaque métier de la conception a son propre outil, adapté à ses spécificités : l'outil est segmenté sur plusieurs niveaux avec une gestion des droits d'accès. L'utilisateur est autonome et ne coopère pas avec d'autres acteurs. Mais peut connaître les résultats des autres équipes.

Le cadre de la méthodologie d'éco-conception proposé est le suivant (Figure 40):

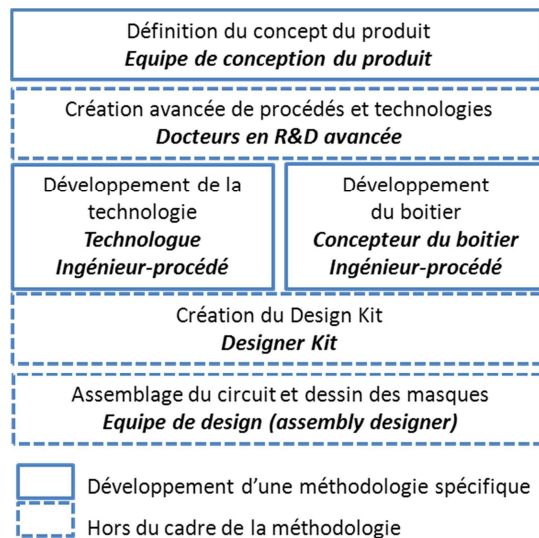


Figure 40 : Cadre et limites de la méthodologie

La méthodologie proposée, avec notamment le mécanisme d'adaptation des modèles par analogie, n'est pas appropriée pour les technologues et ingénieurs R&D qui jouent avec des sauts technologiques majeurs. La prédiction des impacts se fait à partir des générations précédentes et à l'aide de modèles paramétriques développés sur les procédés, ce qui est donc impossible pour des procédés innovants. On se place donc uniquement dans une situation où la conception est faite par analogie et non pas pour la conception radicale. Les sauts technologiques majeurs sont épisodiques dans une entreprise (entre 3 et 5 ans), ce qui confirme l'intérêt de notre hypothèse.

Le degré de liberté des concepteurs du design-kit est limité et leur influence sur les KP-L0 est moindre. Leur responsabilité est donc exclue du cadre de la méthodologie.

Concernant les concepteurs du circuit, si théoriquement leur rôle est important car ils fixent les paramètres de conception liés à l'intégration du produit dans l'application, leur marge de manœuvre est limitée et leur influence sur les KP-L1 est très faible dans des processus de conception industriels. De par l'expérience des chefs de projet et de la conception collaborative par la consultation des experts, les exigences sur la taille du circuit et la puissance des modes sont intégrées dès la traduction du cahier des charges client en cahier des charges technique et donc le designer du circuit doit répondre à ces exigences. Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi de ne pas développer de méthode pour les designers du fait de la faible valeur ajoutée.

4.4 Fonctionnement de la plateforme et articulation outils

La conception du composant microélectronique est divisible en trois parties strictement indépendantes : la définition de la technologie de fabrication du composant semi-conducteur, la conception du boîtier et la conception du circuit intégré. La stricte séparation est acceptable d'un point de vue conceptuel (chapitre 4). Dans le cas de produits d'une nouvelle génération, le développement des trois objets (boîtier, technologie, circuit) pour un même produit sont concomitants mais les cahiers des charges fonctionnels respectifs sont fixés suffisamment tôt pour que l'on puisse considérer que les développements sont indépendants.

Ainsi, la méthodologie prend en compte séparément l'impact des activités des différents acteurs du processus de conception des trois objets (circuit, technologie et boîtier). Chacun de ces objets est soumis à une méthodologie d'éco-conception correspondante. Le processus d'éco-conception d'un produit microélectronique est méthodologiquement divisé en trois volets. La plateforme unique *Green-ST* intègre trois méthodes orientées-métiers:

- pour les concepteurs de la puce, l'outil est *Green-STREAM*⁴⁷ ;
- pour les concepteurs du boîtier, l'outil dédié est *Green-STAMP*⁴⁸ ;
- pour les concepteurs du circuit, l'outil s'appelle *Green-STEP*⁴⁹.

L'articulation des trois outils, supports de la méthodologie pendant la conception, doit permettre d'éco-concevoir le produit dans son ensemble. La plateforme est organisée autour d'une base de données qui regroupe les informations nécessaires à la mise en œuvre (Figure 41).

L'accès à la plateforme doit être facile et rapide. Dans l'entreprise, les applications sont pour la plupart des applications web dont l'accès est sécurisé et restreint. Sur ce modèle, la plateforme est accessible sur l'intranet de l'entreprise sans installation sur PC.

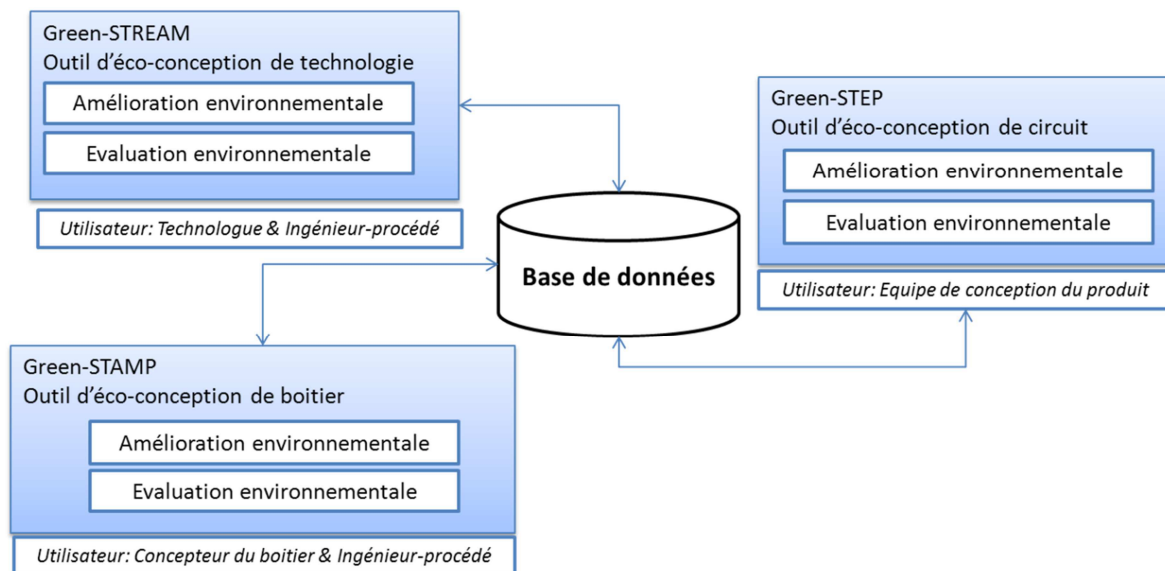


Figure 41 : Articulation des outils de la plateforme autour d'une base de données

Les informations contenues dans la base sont décrites dans le Tableau 42. Initialement, la plupart des informations ont été renseignées manuellement ou semi-automatiquement. Pour prévoir le déploiement, l'accès aux données doit être facilité ainsi que leur inclusion dans la base par des fonctions automatisées. La principale difficulté réside dans la récolte des données de production. Nous verrons ultérieurement les pistes évoquées pour pallier à cette difficulté.

Pour répondre à la modification organisationnelle suggérée dans le chapitre 4 et par la même occasion déployer l'éco-conception dans l'entreprise, un référent est nommé dans chaque organisation. Son rôle est de supporter l'expert éco-conception et d'être le relais opérationnel entre les directives stratégiques et leur implémentation réelle. Leurs principales tâches seront :

⁴⁷ STREAM est l'anagramme de **ST**Microelectronics **R**&**D** and **P**rocess **E**ngineering for **A**dvanced **M**anufacturing

⁴⁸ STAMP est l'anagramme de **ST**Microelectronics **A**dvanced **M**anufacturing of **P**ackages

⁴⁹ STEP est l'anagramme de **ST**Microelectronics **E**co-**P**roducts

- éditer le document unique ;
- supporter les équipes opérationnelles dans l'utilisation de la plateforme ;
- assurer que les tâches obligatoires ont été réalisées.

Tableau 42 : Informations contenues dans la base de données

Phase du cycle de vie	Items	Détails	Sources
Chaîne d'approvisionnement	Traçabilité des substances dangereuses/toxiques	Matériaux contenant ces substances	Fournisseurs et sous-traitants
	IE des matériaux	(UIE/ kg) Incluant fabrication / transport	Eco-Invent
	Masse volumiques des matériaux	(kg/m ³)	Fiches de données de sécurité (FDS) des produits chimiques
	IE du mix énergétique	(UIE/kWh) pays où l'usine est implantée	Eco-Invent
Distribution du produit	Scenario de distribution entre sites	x	Sites de production
	Coordonnées GPS des sites	x	x
	IE des emballages	Emballages de la plaquette et du produit	Fournisseurs et sous-traitants
Fabrication du produit	IE des KP du circuit	x	Résultats de <i>Green-STEP</i>
	Valeurs des KP du circuit	x	Sorties de <i>Green-STEP</i>
	IE des KP de la technologie	x	Résultats de <i>Green-STREAM</i>
	Valeurs des KP de la technologie pour la fabrication du composant	x	Sorties de <i>Green-STREAM</i>
	IE des KP du boîtier	x	Résultats de <i>Green-STAMP</i>
	Valeurs des KP de la technologie pour la fabrication du boîtier	x	Sorties de <i>Green-STAMP</i>
	IE du traitement des matériaux dans l'usine	(UIE/ kg de la substance émise) ; Spécifique au site	Sites de production EcoInvent
Phase d'utilisation	Modèle d'utilisation	Spécifique pour certaines applications (téléphone, automobile)	Données statistiques
	Schéma d'un utilisateur	Européen, américain, chinois, moyen	Données statistiques
	Scenario de fin de vie	-Scenario spécifique à une application (téléphone, voiture) -Scenario de référence pour un composant	Données statistiques
Informations réglementaires	Liste des substances bannies	RoHS	Directive européenne
	Seuils énergétiques	EuP	Directive européenne

*UIE : unités des sept indicateurs des catégories d'impact

Chapitre 11 : Description des outils d'éco-conception de la plateforme Green-ST

Dans ce dernier chapitre, nous veillerons à décrire le fonctionnement des outils imaginés puis développés, au sein de la plateforme. Le fonctionnement des outils est illustré par des études de cas. La conclusion de ce chapitre permet d'évaluer la maturité de l'entreprise pour accepter le déploiement d'une stratégie d'éco-conception et de sa méthodologie associée.

1 *Green-STREAM* : Outil d'éco-conception pour les concepteurs de technologie

1.1 Méthode utilisée pour le développement

Un outil original pour l'éco-conception de technologies a été développé utilisant certains concepts existants. L'originalité tient au fait que le cahier des charges a été défini par un groupe de travail composé d'une dizaine d'ingénieurs de spécialités différentes : technologues (ingénieurs-docteurs concevant les technologies en R&D), ingénieurs-procédé de production, ingénieurs-procédé en R&D et informaticiens en charge des applications de contrôle de la production. L'intérêt de cette mixité est d'avoir développé un outil depuis les besoins et idées des futurs utilisateurs tout en anticipant les contraintes extérieures.

Les technologues ont défini le type de résultats qu'ils jugent utiles et exploitables à partir des données aisément disponibles et qu'ils sont capables de fournir à chaque stade de la conception. La prise en compte de suggestions complémentaires, comme le graphisme de l'interface, les indicateurs, le nom de l'outil ou encore le nombre de livrables, permet une meilleure appropriation par l'utilisateur.

Les contraintes sont principalement celles de la zone de production. La collecte des paramètres des recettes des processus de fabrication a été identifiée comme la difficulté principale pour l'éco-conception des technologies. Les technologues et ingénieurs-procédé de R&D travaillent étroitement avec les ingénieurs de production pour connaître les caractéristiques des recettes. Cependant, ces derniers sont les garants des recettes de production : après avoir mis au point la recette, ils sont en possession des détails nécessaires à l'analyse environnementale (temps, débit des produits chimiques, etc.). Les ingénieurs de production sont des parties prenantes des projets d'éco-conception de technologies mais ne sont pas les acteurs directs. Les contraintes amenées dans leur quotidien devront être minimisées. De plus, un programme de sensibilisation aux questions environnementales est initié afin de s'assurer de l'engagement des ingénieurs et de leur hiérarchie.

L'ACV-simplifiée est appropriée dans le contexte industriel particulier du site de Rousset où la R&D sur les technologies n'est pas de la R&D avancée. Les sauts technologiques sont minimes : l'acquisition d'équipements pour la conception d'une nouvelle technologie est limitée donc les techniques de production sont déjà connues et maîtrisées en production. Les technologues participent à la création de nouvelles technologies inspirées des générations précédentes et

contribuent à l'amélioration de leurs performances. Nous sommes dans un contexte de conception par analogie à opposer à la conception radicale.

On fait ainsi l'hypothèse simplificatrice que les recettes développées pour répondre aux spécificités de la nouvelle technologie ne sont pas radicalement différentes de recettes déjà existantes et que la plupart est réutilisée. De plus, les matières premières des procédés sont pour la plupart déjà utilisées par des recettes en production et les propriétés des équipements sont connues.

1.2 Méthodologie : fonctionnalités, principes intégrés et utilisation

Grâce à cet outil, les performances environnementales de la fabrication de technologies semi-conductrices sont mesurées, contrôlées et peuvent tendre à être améliorées. L'objectif est de donner aux acteurs du développement de la technologie une aide à la conception afin d'envisager des alternatives pour sa re-conception (Figure 42). La re-conception a pour cadre la technologie au niveau L0 et à des niveaux inférieurs : les acteurs de l'éco-conception sont à la fois les technologues et les ingénieurs-procédé. Le profil environnemental de la technologie est systématiquement dressé pour contrôler les performances et la conformité avec les réglementations en vigueur.

L'outil repose principalement sur l'interprétation des résultats d'ACV. Les changements de conception sont évalués afin de décider de leur statut environnemental (positif, négatif ou neutre). L'évolution par rapport aux précédentes générations est étudiée. Enfin pour améliorer les performances, les points faibles sont surlignés et la meilleure option disponible est proposée pour évaluation. Des plans d'action peuvent être établis lors de dysfonctionnements majeurs. Une veille particulière sur les substances sensibles est possible.

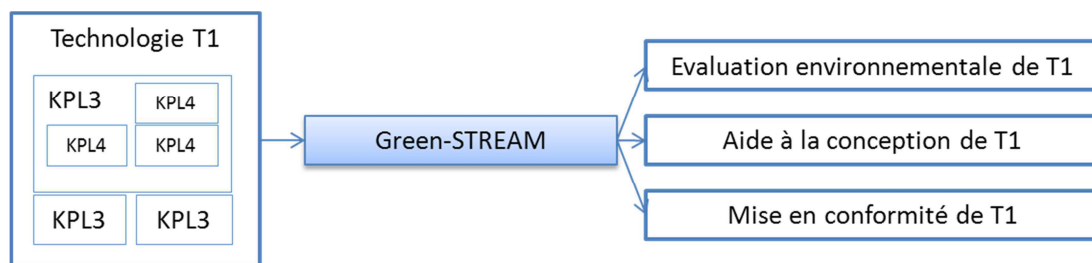


Figure 42 : Fonctionnalités de *Green-STREAM*

Une technologie est éco-conçue grâce à l'expérience déjà acquise sur la ou les technologie(s)-mère. L'outil a été utilisé sur les technologies-mère pour lesquelles d'une part les impacts environnementaux sont connus et d'autre part des actions d'éco-conception, réussies ou non, ont été évoquées. En effet, les conjectures envisagées faciliteront les prises de décision sur une nouvelle technologie en développement. Par ailleurs, les modifications entreprises sur une technologie en conception peuvent être répercutées sur les technologies-mère déjà en production. Ce fonctionnement s'inscrit dans les principes de l'amélioration continue. La Figure 43 illustre le fonctionnement de la méthodologie sur une technologie T2 dont T1 est la technologie-mère. Une technologie peut posséder plusieurs technologies-mère.

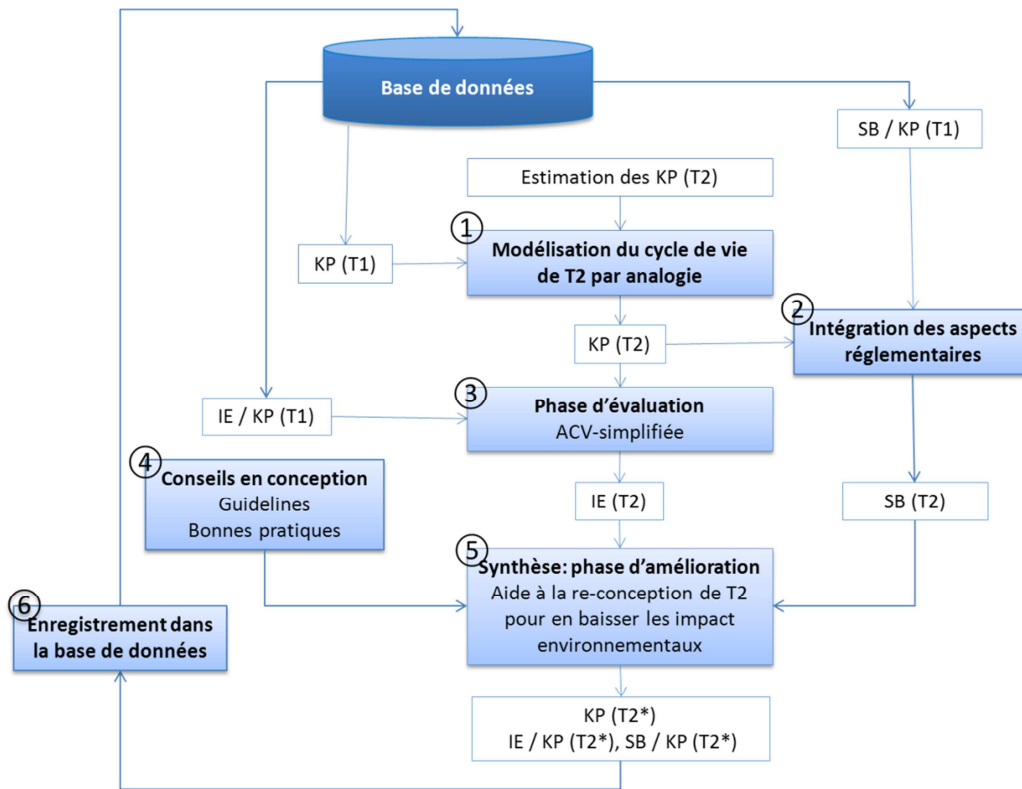


Figure 43 : Fonctionnement de Green-STREAM

A l'étape 1, les paramètres-clé de la technologie T2 sont construits par analogie avec la technologie-mère. Les performances environnementales sont relatives aux aspects réglementaires avec les substances bannies et les impacts calculés. Ces éléments sont évalués avec une ACV-simplifiée grâce aux informations stockées dans la base de données: paramètre de conception (KP), impacts unitaires (IE/KP), substances bannies (SB) (étapes 2 et 3). D'autres éléments d'aide à la prise de décision indépendants de la technologie sont amenés au concepteur (étape 4). A ce stade, le concepteur possède tous les éléments environnementaux relatifs à la technologie en conception. Dans une phase de synthèse, la technologie T2 peut être améliorée en fonction des résultats environnementaux et de l'expérience des concepteurs (étape 5). En sortie, les impacts et paramètres de conception de T2*, version éco-conçue de T2, sont enregistrés dans la base (étape 6).

1.3 Description détaillée de *Green-STREAM*

La plateforme est transversale, dédiée à une usine de production. Les utilisateurs sont les technologues et les ingénieurs-procédé. Toutefois, chacun possède une propre interface pour éco-concevoir tour à tour la technologie, les différents modules et niveaux de masques, ainsi que les briques élémentaires, les procédés. La méthodologie propose des fonctionnalités différentes selon le niveau de connaissance de la technologie en développement. *Green-STREAM* a été testé sur la technologie T11, en développement pendant les deux dernières années de la thèse.

1.3.1 Stades préliminaires de la conception (Conceptual Design)

a) Concepts et méthodes

Une méthode d'ACV-simplifiée a été développée spécifiquement pour mesurer les performances environnementales de technologies à mémoire non volatiles (NVM) dans les stades préliminaires de

la conception. Il s'agit de décrire la structure de la technologie à partir de paramètres-clé. Au début de la conception, la route de fabrication n'est qu'une ébauche et ne peut donc être évaluée par une ACV. Le technologue décrit la structure macroscopique, selon le cahier des charges fonctionnel.

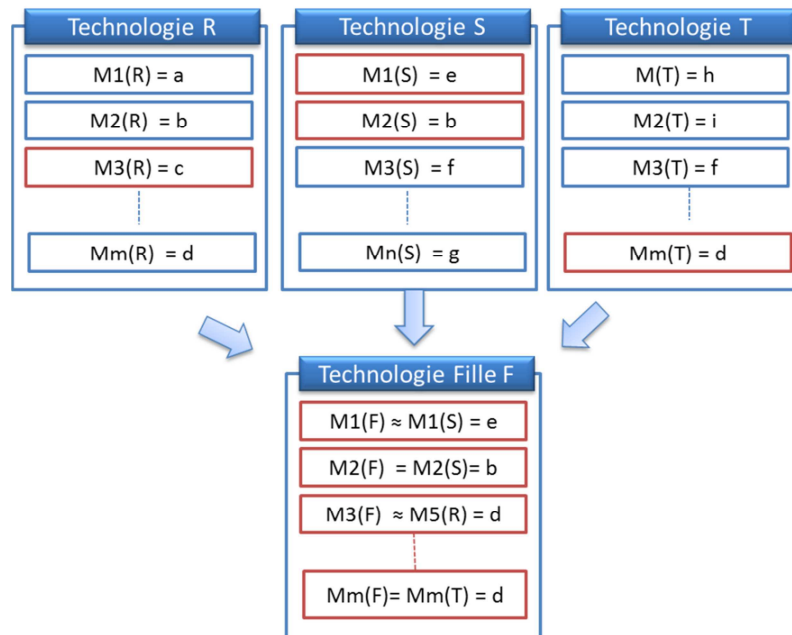


Figure 44 : Description d'une nouvelle technologie en fonction des modules des technologies-mère

Comme schématisé sur la Figure 44, le technologue décrit la technologie en termes de paramètres-clé, les modules : il s'agit de la dimension et de la nature d'une structure ou d'un niveau de masque. Les modules sont les paramètres-clé de niveaux 3 d'une technologie, KP-L3. Les technologies R, S et T sont les technologies-mère de la technologie en développement F. Le nombre de modules (m) varie selon les options embarquées dans la technologie. Les modules sont décrits, dans la limite du possible par le technologue, sinon il sélectionnera le module qui en sera le plus proche. Les technologies définissent un nouveau module lorsqu'une nouvelle structure est créée.

Une fois les modules construits, les impacts de la technologie-fille sont calculés comme suit :

Pour j allant de 1 à 7, où j représente un des sept indicateurs d'impacts présélectionnés

$$IE/Cj(F) = \sum_{i=1}^m IE/Cj[Mi(F)] * k_i$$

où $IE/Cj(F)$ est l'impact environnemental de la technologie F sur la catégorie d'impact Cj

les $Mi(F)$ sont les différents modules de la technologie F

k_i des éventuels facteurs correctifs associés au modèle paramétrique

m est le nombre de modules de la technologie F

Cette option d'ACV-simplifiée donne la possibilité de déduire rapidement les impacts d'une nouvelle technologie en reprenant ceux des technologies-mère. La seule condition est que les impacts des technologies-mère aient déjà été évalués et que les impacts des modules aient été enregistrés dans la base de données.

b) Cas d'étude sur la technologie T11

• Préparation de l'étude : travail préliminaire avant la revue de conception



L'équipe de conception est constituée de 5 technologues et d'un chef de projet. L'équipe se réunit régulièrement en revue de conception afin d'évaluer le travail réalisé et de planifier les étapes suivantes. A ce stade de la conception, la plupart des paramètres structuraux de T11 sont fixés, mais aucun échantillon n'a encore été testé. La technologie est développée pour répondre à des minima de performances en termes de fonctionnalités et de dimensions : la taille, la consommation d'électricité et le temps d'accès à la mémoire seront diminués.

L'expérimentation vise à mesurer, au moyen de la plateforme, l'impact de cette technologie une fois industrialisée. Deux technologies-mère sont identifiées par le chef de projet : T10 et S10. T11 a des caractéristiques issues de ces technologies : ce sont des technologies à mémoire non volatile, sur un nœud de 90 nanomètres. La route de fabrication de T11 présentera a priori des similitudes avec ces technologies-mère. Une ACV est réalisée sur les deux technologies, selon la méthode décrite dans la Partie II, avec une simplification de l'inventaire par la réunion de recettes dans des groupes de résultats. Les impacts des paramètres-clé (modules) sont enregistrés dans la base.

• Test de la plateforme et génération des résultats pendant la revue de conception

Reproduction de l'interface, le Tableau 43 résume les données recueillies au cours de la réunion.

Tableau 43 : Modèle de la technologie T1

Type	Paramètres-clé / M(T1)	Description
A : modules obligatoires ; analogie avec une technologie-mère	Cell	S10
	Active	S10
	Floating gate	T10
	Salicide protection	T10
	Salicide	T10
	Contact	S10
	Spacer	T10
	Back end of line	T10
	Poly-metal dielectric	T10
	Gate	T10
	Inter-metal dielectric	T10
	Passivation	T10
B : modules optionnels ; analogie avec une technologie-mère	Extra module 1 : Floating gate doping	S10
C : description de paramètres-produit obligatoires	Nombre de lignes	
	Epaisseur dernière ligne	
	Matrix	Double
D : précision des types de transistors embarqués	High voltage	oui
	Low voltage	oui
	Medium voltage	non
	Ultra high voltage	non
	High speed	non

Les champs sont remplis en activant des menus déroulants. Pour les 12 paramètres de type A, le technologue sélectionne la technologie-mère. Le technologue a la possibilité de mentionner d'autres modules non inclus dans les paramètres de type-A : ce sont les différentes options (B). Pour les paramètres de type C, le technologue entre une valeur. Enfin, pour les paramètres de type D, le technologue répond par «oui» ou «non» pour notifier les types de transistors embarqués.

- Après la revue de conception

L'interprétation des résultats a donné lieu à une réunion supplémentaire avec l'équipe. La Figure 45 montre l'un des résultats obtenus : les impacts environnementaux de la technologie T11 par rapport aux générations précédentes concernant le potentiel de réchauffement de la planète.

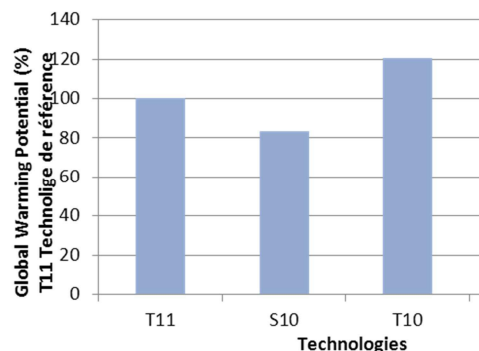


Figure 45 : Impacts environnementaux de la technologie T11 et de ses technologies-mère

Les Pareto pour chaque indicateur sont calculés: les dix étapes élémentaires les plus polluantes et les sources qui, ensemble, comptent pour plus de 90% des impacts. L'interprétation de ces graphiques permet à l'équipe R&D d'établir les tendances et les orientations pour l'amélioration et plusieurs idées s'ensuivent sur les moyens d'améliorer les performances de la technologie T11.

Depuis que le cuivre est utilisé pour former des couches de métal dans le module « back-end of the line », la qualité de l'eau à travers de l'indicateur «écotoxicité aquatique» a été considérablement dégradée : une enquête a été ouverte pour diminuer la consommation de cuivre et par conséquent les émissions de particules de cuivre dans les eaux usées. Une suggestion est de diminuer l'épaisseur initialement déposée pour chaque ligne, puis de créer un processus plus précis pour retirer l'excès de matière par CMP (polissage mécanique et chimique).

Le même type de travail a été demandé aux ingénieurs responsables de bains pour le nettoyage des plaquettes, afin de diminuer la consommation d'eau ultra-pure qui est responsable de 16,5% de l'effet d'eutrophisation.

1.3.2 Stades avancées de la conception (Embodiment)

a) Création d'un outil d'ACV-complet

Lorsqu'on avance dans la conception, la quantité de connaissances sur la future technologie augmente : dès le début de la conception détaillée, des premiers échantillons sont testés et une route de fabrication est créée. Cette route va a fortiori évoluer et certaines modifications seront

réalisées. Ces modifications ont plusieurs origines : diminution du coût par plaquette, rendement, amélioration de la fiabilité⁵⁰, performances électriques et rationalisation de procédés existants.

Quelle que soit la raison d'une modification, son impact sur l'environnement peut être évalué et alors la dimension environnementale est susceptible d'entrer dans le processus décisionnel au même titre que les autres dimensions. Il est donc intéressant d'estimer directement l'impact d'un nouveau module avec une ACV (simplifiée ou non) et comparer ses impacts à la fois avec la précédente version mais aussi avec les modules-parent. On le conseillera particulièrement lorsque le statut sur l'environnement (positif, négatif ou neutre) ne peut être déduit de manière instinctive ou lorsque la technique de fabrication est innovante.

b) Cas d'étude sur le module « grille flottante » de la technologie T11

Ce cas d'étude illustre la marche à suivre lorsqu'une structure est nouvelle : ici on étudie un changement dans la fabrication de la grille flottante (FG). La grille flottante est une structure spécifique de mémoires non-volatiles utilisée comme une cellule mémoire stockant les électrons. Pour le module « grille flottante » de la technologie T11, une ACV spécifique peut être réalisée avec les connaissances actuelles, assez primaires, de ce stade de la conception. Dans les stades préliminaires, les technologues avaient considéré que le module FG était inspiré de celui de T10. Nous avons donc cherché à comparer ces deux modules.

La séquence de fabrication pour former la FG est la suivante : dépôt de poly-silicium, photolithographie pour la définition des zones à doper, implantation ionique dans la FG, retrait de la résine, nettoyage, photolithographie pour la définition des motifs de la FG, nettoyage, gravure et élimination de la résine.

En raison de dimensions réduites, trois étapes sont considérablement modifiées dans le nouveau module par rapport à la technologie-mère : le dopage par implantation ionique, la photolithographie pour la définition de la FG et la gravure. Comme les procédés sont encore en développement, quelques hypothèses sont faites sur la valeur des paramètres des recettes (durée, débit de produits chimiques, etc.). Grâce à l'expérience des ingénieurs-procédé de R&D, la déduction est faite en supposant l'évolution depuis des valeurs sur le module FG de T10. Les avantages ou les pertes en termes environnementaux ne sont pas évidents a priori car il y a plusieurs changements dans les recettes (Tableau 44).

Tableau 44 : Description des changements du module FG de T11 par rapport au module T10

Etape	Changement de la structure	Changement de la recette
Dopage	Implantation moins profonde : énergie générée par l'implanteur est diminuée	Moins d'énergie consommée Moins de gaz consommés
Photolithographie	De faibles dimensions augmentent les risques d'effondrement des lignes donc l'épaisseur de résine photosensible est diminuée	Petites variations de temps
Gravure	De faibles dimensions augmentent les risques de défectivité (défaut en raison de motifs irréguliers). Le profil de la gravure dans la ligne est modifié.	Consommations faibles de Cl_2 , HBr , CF_4 Consommation accrue de CH_2F_2

⁵⁰ Nombre de cycles, rétention, endurance logique

L'analyse du changement est restreinte à quatre indicateurs, relatifs aux effets de chacune des étapes. En changeant la structure du module FG, l'ACV souligne que la pression sur l'environnement induite par le module est réduite par rapport à la génération précédente (Figure 46).

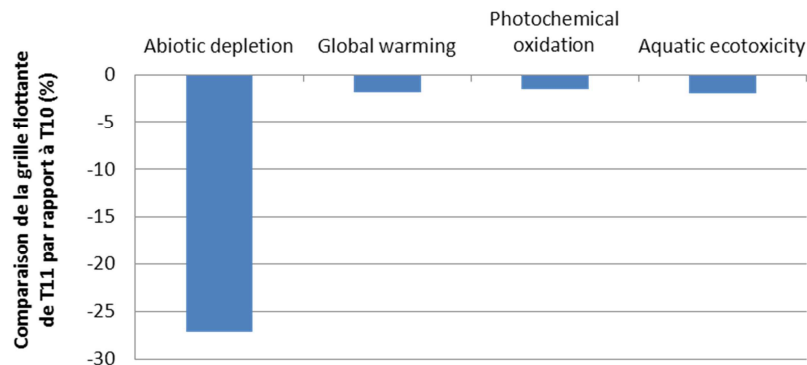


Figure 46 : Bénéfice environnemental entre les modules FG de T10 et T11

L'expérience a donné lieu à des observations surprenantes. Sur l'étape de photolithographie, l'épaisseur de résine photosensible est réduite. Cependant, au niveau du procédé, le volume de résine déposée sur la plaquette est le même que précédemment. En effet, ce volume est constant quelle que soit l'épaisseur finale demandée, car il est défini selon les propriétés du matériau, telle que sa viscosité. L'épaisseur restante est fonction de la vitesse de rotation du plateau sur lequel la plaquette est fixée et l'excès est éliminé par effet centrifuge (Figure 47). Cet aspect était méconnu des technologues et de fait pour eux la réduction de l'épaisseur de résine était susceptible d'avoir un effet positif sur l'environnement.

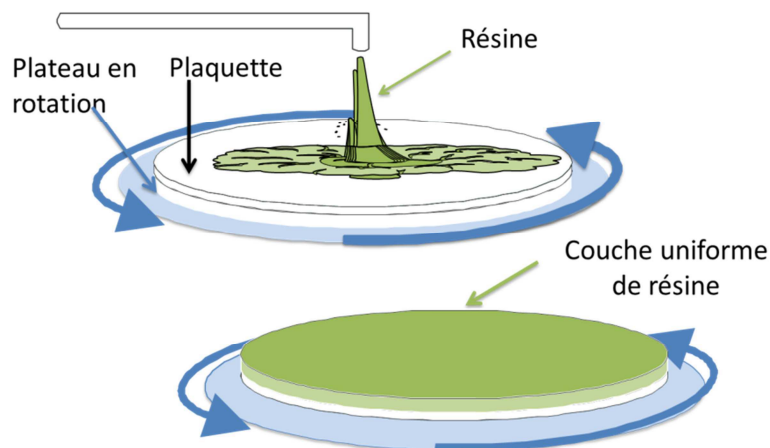


Figure 47 : Représentation schématique du dépôt de résine sur une plaquette

Alors que tous les aspects environnementaux sont légèrement améliorés, le bénéfice est très important pour l'indicateur « amenuisement des ressources ». Sur cet indicateur, la substance « xénon, dans l'air » est la cinquième contribution la plus importante. Le xénon est utilisé en implantation ionique afin de créer un plasma à proximité de la surface de la plaquette pour rendre disponible les électrons pour les niveaux les plus profonds, et éviter ainsi les effets de charging⁵¹. Le fait de réduire la durée du processus de dopage de la FG de 10 secondes permet une diminution drastique de 74% de l'impact sur l'amenuisement des ressources.

⁵¹ Accumulation d'électrons dans les couches profondes

1.3.3 Technologie en production : éco-conception des procédés de fabrication

a) Méthode utilisée pour le développement

Bien que l'éco-conception soit principalement destinée aux concepteurs dans les phases amont de conception, les ingénieurs de production sont également acteurs d'une politique intégrée des produits. Dans des conditions de production où rendement et coût sont les maître-mots, les pratiques ne permettent que rarement de mettre en avant des projets dont l'objet est d'optimiser les performances environnementales. Cependant, la diminution de la consommation d'énergie et de matériaux et la gestion des déchets sont des leviers pour diminuer les coûts de fonctionnement d'une usine. Sur un site, le contrôle de ces aspects est de la responsabilité des facilités et non des ateliers de production directement. Ce principe est notamment mis en avant par des concepts de «Green Fabs». Par exemple, [Cohen'03] décrit les efforts réalisés par Intel pour la diminution de la consommation d'énergie grâce à la collaboration entre différents services de l'entreprise.

Pour une technologie en production, les ingénieurs-procédé peuvent choisir de diminuer l'empreinte environnementale des procédés sans altérer les performances de la puce, en termes de propriétés physiques et électriques et rendement. Il existe quelques exemples publiés d'optimisation de procédés basée principalement sur des paramètres environnementaux. [Chan'04] a expérimenté deux nouvelles recettes de nettoyage après des étapes de CVD permettant la réduction de la consommation de PFC. A des fins purement environnementales, [Pistoni'07] présente un cas où le SF₆ a été éliminé des procédés de gravure. L'intérêt de ces études est que le critère environnemental a été le levier d'action et de motivation pour optimiser le procédé, par rapport à d'autres où l'analyse environnementale est faite a posteriori pour vérifier que l'impact environnemental du changement de procédé est positif.

b) Cas d'étude sur les recettes de « gravure poly » de la technologie T11

On distingue plusieurs types de gravure sèche : les gravures sur couche de métal, d'oxyde de silicium et de poly-silicium. En fonction de la nature du matériau à graver, les techniques sont différentes de par les équipements, les types de chimie et les conditions physiques dans la chambre de gravure (fréquence du générateur plasma, température, pression).

Le travail présenté ici est centré sur les étapes de gravure sèche sur poly-silicium. Les travaux ont été réalisés avec l'aide d'un groupe de travail, constitué d'ingénieurs-procédé, de technologues, ingénieurs-équipement, ingénieurs maintenance et ingénieurs en charge des applications informatiques de production. Les expérimentations sont réalisées sur des technologies non matures, en phase de conception détaillée. Le degré de liberté y est plus important pour l'ingénieur-procédé.

Les cinq étapes de gravure de poly-silicium de la technologie T11 ont été soumises à une analyse environnementale. Au début de l'étude, une version des recettes a déjà été mise au point, répondant aux critères techniques de la nouvelle technologie. L'analyse environnementale est réalisée par une ACV complète. Le nombre d'indicateurs considérés pour chacun des ateliers est réduit : réchauffement climatique (pour l'utilisation d'électricité et de PFC), amenuisement des ressources (pour l'utilisation d'hélium) et l'écotoxicité dans l'eau (pour l'utilisation de chlore, brome, fluor). Les performances des cinq niveaux sont comparées sur les trois indicateurs. Les résultats sont extraits de l'outil (Figure 48).

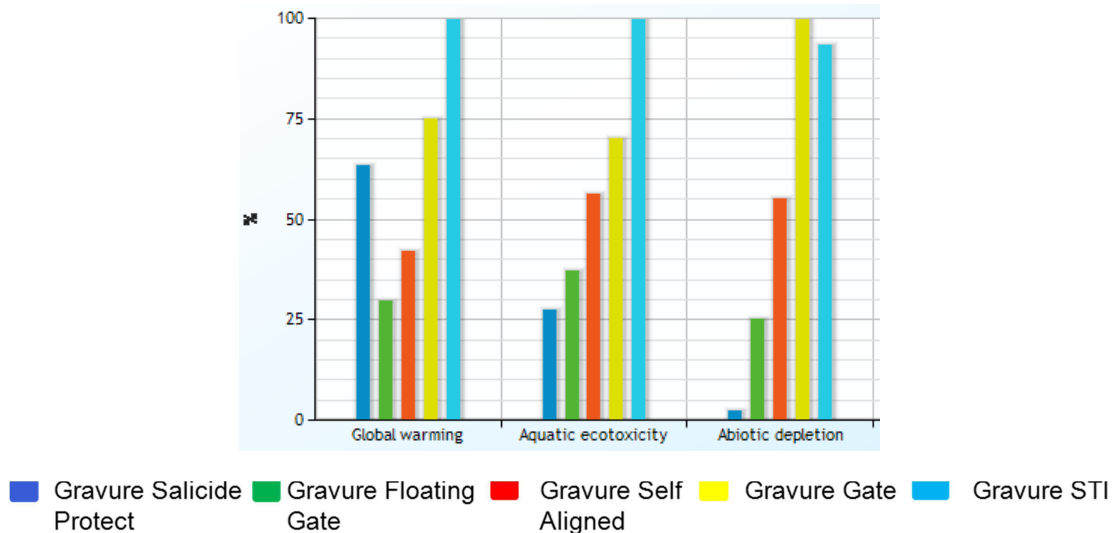


Figure 48 : Comparaison des performances environnementales des étapes de gravure poly de T11

Deux recettes ont été identifiées comme les plus critiques dont la gravure STI (Shallow Trench Isolation) intervenant dans le module « Active ». Un budget a été établi pour réaliser des prototypes avec les modifications sur les deux recettes identifiées lors de la phase d'analyse environnementale. Pour chaque recette, un lot⁵² morphologique pour le développement des recettes a été attribué ainsi qu'ultérieurement un lot électrique pour le test des recettes obtenues. Les recettes originales ont été qualifiées pour la production et donc toute modification doit être qualifiée à nouveau par une série de tests.

Une recette de gravure est divisée en une vingtaine d'étapes élémentaires. Tout changement de consignes engendre une nouvelle étape. Avant et après la recette, des étapes sont ajoutées pour le conditionnement de la chambre de gravure. Pour chaque recette et chaque indicateur, l'impact par étape est calculé et pour les étapes les plus polluantes, les principales contributions de pollution sont identifiées (gaz, électricité). La Figure 49 présente pour l'étape de gravure STI les étapes les plus polluantes pour l'indicateur « réchauffement climatique », tandis que la Figure 50 identifie les sources de pollution sur un exemple⁵³.

A ce stade, l'expertise conjointe de l'ingénieur-procédé et du technologue permet de définir si les sources d'impact mises en avant peuvent être modifiées. L'approche est d'observer les pollutions les plus importantes grâce à l'outil et d'envisager toutes les modifications possibles, sous forme de brainstorming, et d'en évaluer les risques. Si un risque est jugé trop important, aucune tentative ultérieure ne sera retenue. Les propositions de modification pour l'étape de gravure STI sont résumées dans le Tableau 45.

La prochaine étape consiste à simuler les modifications proposées grâce à *Green-STREAM* et observer si elles ont un impact environnemental positif, et dans ce cas, mesurer les bénéfices. Les résultats de cette étude (comme la réduction des temps de WAC, et des temps de stabilisation ou la

⁵² Un lot de production est un ensemble de 25 plaquettes.

⁵³ Les acronymes désignant les étapes élémentaires sont volontairement non explicités pour des raisons de confidentialité

réduction des débits d'hélium) seront communiqués via la plateforme collaborative d'échanges entre les ingénieurs gravure de l'entreprise.

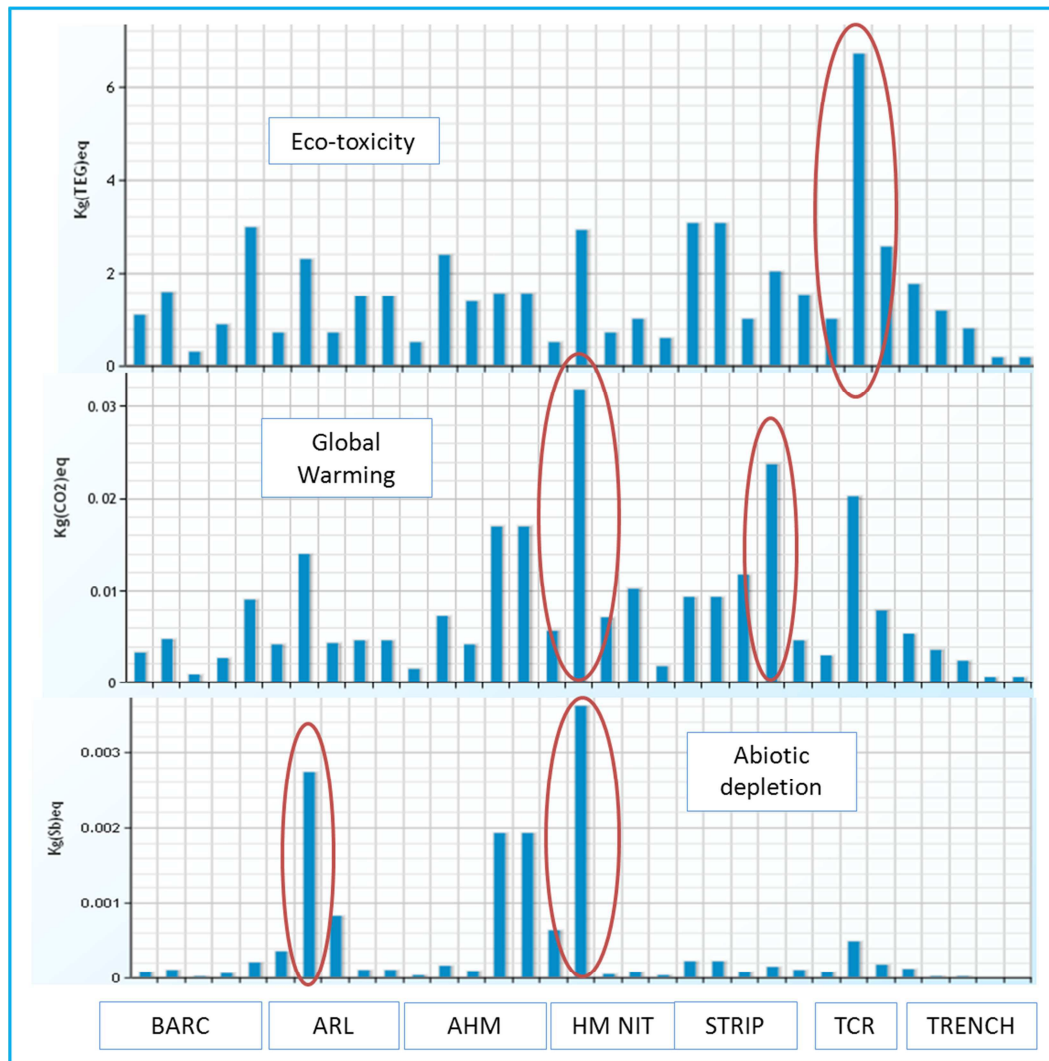


Figure 49 : Impact des étapes de la gravure STI sur les trois indicateurs

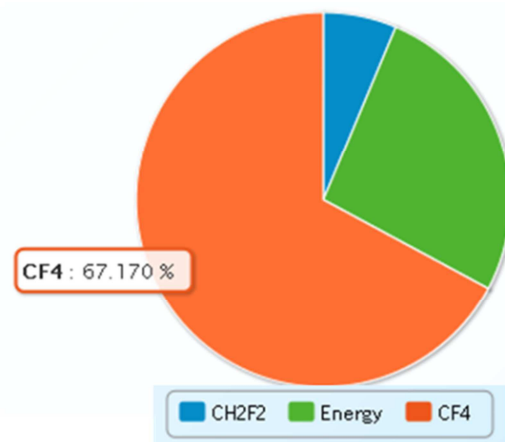


Figure 50 : Contributions des flux au réchauffement climatique pour l'étape HMNIT

Tableau 45 : Propositions de modification de la recette de gravure STI

Etape	Point critique	Rôle de la substance / Conséquence sur le procédé	Action d'éco-conception
HM NIT	CF4	C'est le gaz gravant. Le fait de réduire son débit va réduire la vitesse d'attaque, et il faudra augmenter le temps de l'étape pour graver complètement la couche.	Le changement n'est pas nécessairement positif pour l'environnement : la modification est simulée avec <i>Green-STREAM</i> .
	CH2F2	C'est le gaz permet de contrôler les dimensions des blocs gravés. Ce gaz réagit avec la substance gravée pour former des composés carbonés. Ces composés viennent se déposer sur les flancs des blocs à graver, et les protègent ainsi d'une gravure latérale. Si on réduit le débit de ce gaz, les blocs seront gravés latéralement et les CD*diminueront.	Aucune modification ne peut être envisagée.
TCR (Top Corner Rounding)	CHF3	Ce gaz joue sur le profil du bloc gravé, et donc sur son comportement électrique. Le profil est particulièrement sensible aux variations de CHF3. Le TCR est un détail morphologique qui joue sur les performances électriques (en facilitant le passage des électrons). (Figure 51)	Le risque est jugé trop important ; aucune modification n'est envisagée
Temp Up/Down	CF4 / Electricité	Ces étapes sont des étapes de transition en température, aucune couche n'est gravée. Les gaz envoyés n'ont donc pas d'utilité (d'autant plus que l'étape suivante est précédée d'une étape de stabilisation).	Les gaz sont supprimés pour ces étapes.

* La CD (Critical Dimension) est la largeur du bloc gravé : c'est un des paramètres utilisés pour vérifier les performances de la gravure.

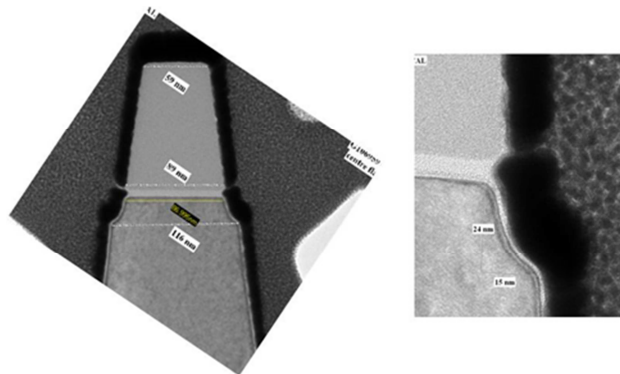


Figure 51 : Vue générale du bloc (à gauche) / zoom sur le Top Corner Rounding (à droite)

1.4 Perspectives pour l'intégration future de *Green-STREAM*

L'évaluation environnementale d'une technologie en développement, à différents stades de la conception et à plusieurs niveaux (technologie, module, procédé) a été réalisée avec succès grâce à la collaboration et la participation active d'une équipe de conception. Cette expérimentation était une partie intégrante de l'élaboration et du test de l'outil prototype présenté ci-avant. L'interface a évolué grâce à ces cas d'étude car il a pu être défini quelles fonctionnalités étaient intéressantes et si la prise en main par l'utilisateur est suffisamment facile pour que l'ingénieur utilise seul l'outil. Des modifications au cahier des charges initial ont été apportées grâce à cette collaboration, mais surtout cela a permis de valider l'intérêt des ingénieurs pour ce genre d'étude puisqu'un budget et du temps a pu être alloué à ce projet.

Il était attendu de cet outil de montrer aux concepteurs que les critères environnementaux peuvent être systématiquement pris en compte dans leur processus décisionnel. Cette expérience a représenté la première expérience d'éco-conception dans cette équipe et a donné quelques perspectives avant d'envisager d'y recourir systématiquement en conception.

Cette expérience a validé une méthode capable de faire prendre conscience aux concepteurs les aspects environnementaux de leurs activités de conception sans contraintes déraisonnables. Même si tous les résultats n'ont pas été utilisés et intégrés pour la re-conception, les concepteurs sont aujourd'hui conscients que toutes les décisions de conception sont susceptibles d'avoir un effet sur l'environnement.

L'utilisation de l'hypothèse simplificatrice qui traduit que la conception est principalement composée par analogie a été appréciée et soutenue : chaque fois que l'ACV d'une technologie, module ou étape de fabrication est réalisée, les IE sont enregistrés dans la base de données. Plus la connaissance des technologies en production augmente, plus la gamme des procédés de fabrication couverte est large et donc l'évaluation des futures technologies en sera plus rapide.

Pour les déploiements futurs, l'intégration de modèles paramétriques au niveau des processus comme ceux proposés par [Murphy'03-a] et [Somani'06] est souhaitée. Ils permettront de prédire les impacts environnementaux des futures technologies au niveau des procédés élémentaires. En outre, les paramètres-clé sont amenés à changer lorsque d'autres technologies, comme les MEMS, seront modélisées ou pour couvrir des nœuds technologiques plus agressifs.

2 *Green-STAMP* : un outil d'éco-conception pour les concepteurs de boîtiers

2.1 Méthodologie d'éco-conception de boîtier: fonctionnalités et utilisation

L'outil *Green-STAMP* repose sur l'interprétation de la mesure des impacts environnementaux de la fabrication d'un boîtier. Les changements de recettes, les décisions de conception, l'évolution par rapport aux précédentes générations seront évalués.

Les utilisateurs sont les ingénieurs d'une équipe de projet de développement et qualification d'un nouveau boîtier. L'outil est destiné à améliorer les performances du boîtier en général mais également à un niveau inférieur, l'ingénieur-procédé peut tester des choix sur les procédés. Les résultats sont exploités individuellement ou en équipe lors des revues de conception.

Contrairement à la fabrication de la puce, l'encapsulation dans le boîtier est un processus d'assemblage assimilable à des industries manufacturières conventionnelles, comme celle de l'électronique. L'étude des méthodes d'éco-conception existantes prend alors un angle plus large. Toutefois les vecteurs d'intégration précédemment cités sont toujours à prendre en compte : organisation interne des équipes, disponibilités des informations, sensibilité des concepteurs, rythme des réunions de suivi de projet etc. Un outil original a donc été déployé à partir de concepts non originaux. L'originalité vient du fait que, comme les autres outils, le cahier des charges a été défini par une équipe de concepteurs, par le biais d'un groupe de travail. L'équipe est formée d'une dizaine d'ingénieurs-procédé et d'un chef de projet.

L'objectif de *Green-STAMP* est de donner au concepteur de boîtier une aide à la conception afin d'envisager des alternatives pour la re-conception d'un boîtier en développement (Figure 52). Le profil du boîtier est dressé systématiquement pour contrôler les performances et la conformité de la conception.

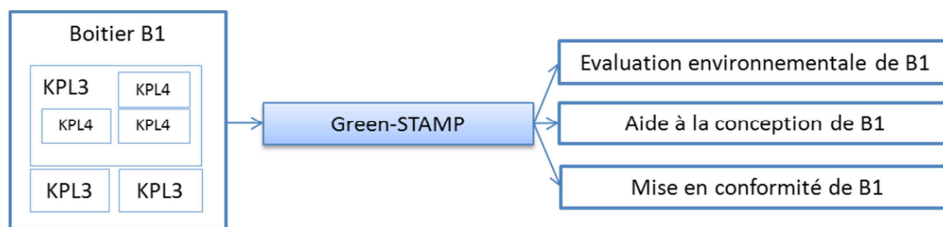


Figure 52 : Fonctionnalités de *Green-STAMP*

Le fonctionnement théorique de *Green-STAMP* présenté en Figure 53 est le même que *Green-STREAM* sur les puces (Figure 43), excepté l'utilisation de guidelines et bonnes pratiques qui n'a pas été évoqué, ici. Toutefois cet aspect méthodologique pourra être reproduit dans des phases ultérieures. Un boîtier est éco-conçu notamment en le comparant aux précédentes générations. Les remarques qui ont pu être précédemment émises sont intégrées dans la conception du nouveau boîtier, tandis que toutes les évolutions d'un paramètre du boîtier (structure ou technique de production) peuvent être cascadiées sur les boîtiers utilisant ce paramètre.

Les conseils pour la re-conception sont les mêmes que pour la conception de la puce :

- l'impact des décisions de conception est évalué ;
- l'évolution par rapport aux précédentes générations est étudié ;
- mise en avant des points faibles ;
- des plans d'action sont demandés lors de dysfonctionnements majeurs ;
- veille particulière sur les substances sensibles.

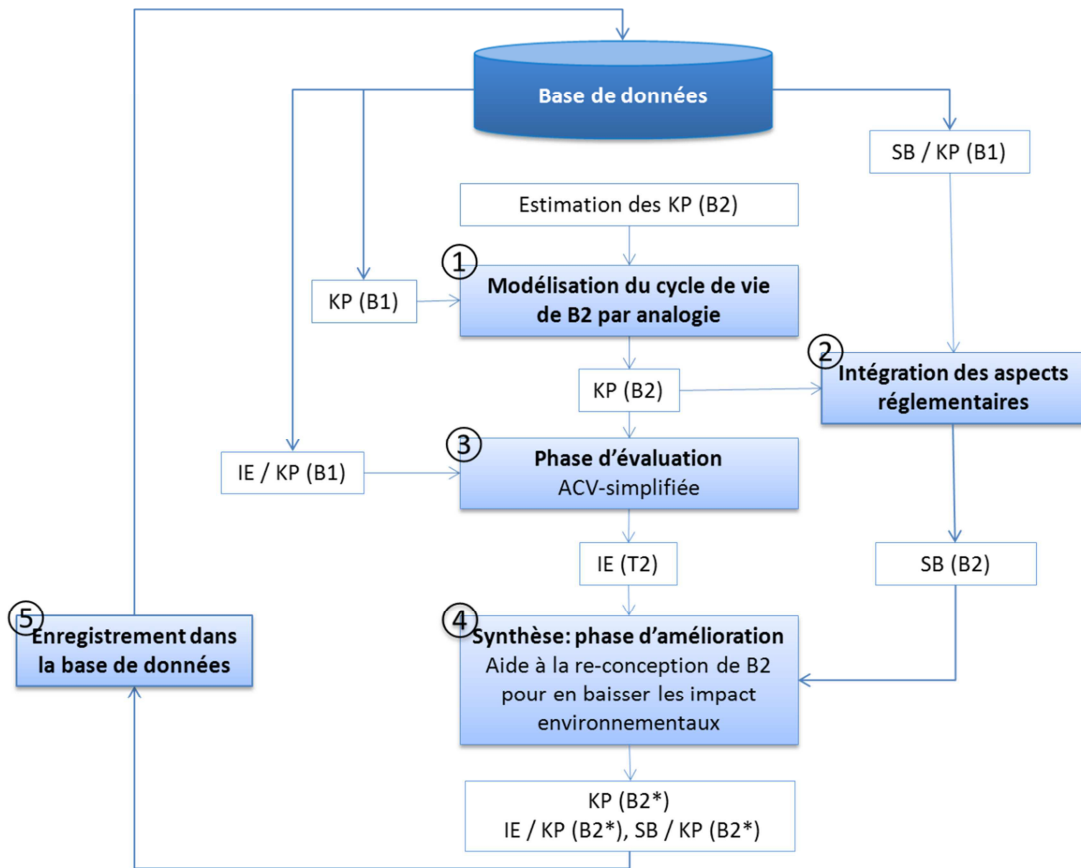


Figure 53 : Fonctionnement de Green-STAMP

2.2 Prédiction des impacts environnementaux d'un boîtier en conception

L'ACV-simplifiée est basée sur le principe que l'on peut déduire les données d'ICV d'un procédé à partir de modèles simplifiés et donc calculer l'empreinte environnementale à partir d'un faible nombre de paramètres-clé. Plusieurs niveaux sont utilisés pour la construction du modèle environnemental par analogie :

- les paramètres de niveau 3 (KP-L3) : ce sont les modules d'assemblage du boîtier ;
- les paramètres de niveau 4 (KP-L4) : ce sont les procédés de la route d'assemblage ;
- les paramètres de niveau 5 (KP-L5) : ils sont liés aux flux entrants/sortants des procédés.

Contrairement à la fabrication du composant, la route comprend peu d'étapes et donc chacune peut être considérée individuellement au niveau 3 puis au niveau 4. Le calcul des impacts environnementaux d'un boîtier se calcule directement en sommant les impacts environnementaux des paramètres-clé pertinents des différents niveaux. Le concepteur choisit le niveau approprié selon ses connaissances sur le boîtier et le degré d'innovation du boîtier et des procédés.

Pour j allant de 1 à 7, où j représente un des sept indicateurs d'impacts présélectionnés

$$IE/C_j(B1) = \sum_{i=1}^m IE/C_j[M_i(B1)] + \sum_{i=1}^n IE/C_j[P_i(B1)] + \sum_{i=1}^p IE/C_j[KP_i(B1)]$$

- Avec
- $IE/C_j(B1)$ est l'impact environnemental du boîtier $B1$ sur la catégorie d'impact C_j ;
 - les $M_i(B1)$ sont des paramètres-clé de niveau 3 du boîtier $B1$, les modules ;
 - les $P_i(B1)$ sont des paramètres-clé de niveau 4 du boîtier $B1$, les procédés ;

- les KPi ($B1$) sont des paramètres-clé de niveau 5 du boîtier $B1$, les paramètres des recettes ;
- m est le nombre de paramètre-clé de niveau 3 pertinents pour l'évaluation
- n est le nombre de paramètre-clé de niveau 4 pertinents pour l'évaluation
- p est le nombre de paramètre-clé de niveau 5 pertinents pour l'évaluation

Avec l'utilisation de l'AVC-simplifiée à partir des niveaux 4 et 5, nous faisons l'hypothèse suivante : « la plupart des recettes de production qui seront utilisées pour l'assemblage sont déjà industrialisées ou possèdent une proche version ». Cette hypothèse amène les deux suivantes : « la plupart des matériaux ont déjà été testés sur des boîtiers de générations antérieures », « la plupart des équipements ont des propriétés connues ». Le terme « la plupart » est volontairement vague car ce pourcentage dépend du degré d'innovation du boîtier.

Cette propriété de conception par analogie amène naturellement la notion de recette-mère. Quand la conception d'un nouveau boîtier est initiée, l'équipe en charge de la conception identifie les générations de boîtiers desquelles le boîtier est inspiré. Pour certaines étapes de l'assemblage, l'ingénieur-procédé décrit les caractéristiques de la recette du procédé et les compare à une recette-mère (pointillés sur la figure). Cette option n'a pas été sélectionnée pour toutes les étapes, puisqu'elle n'est pas pertinente lorsque le nombre de paramètres-clé est faible – et donc l'ingénieur-procédé peut rapidement décrire les paramètres ou lorsque les paramètres-clé sont différents quels que soient les boîtiers (Figure 54). La modélisation du procédé au travers d'un nombre réduit de paramètres induit une erreur dans le calcul final mais étant donné que le boîtier est en cours de conception, cette solution est acceptable pour avoir une idée des performances du futur boîtier.

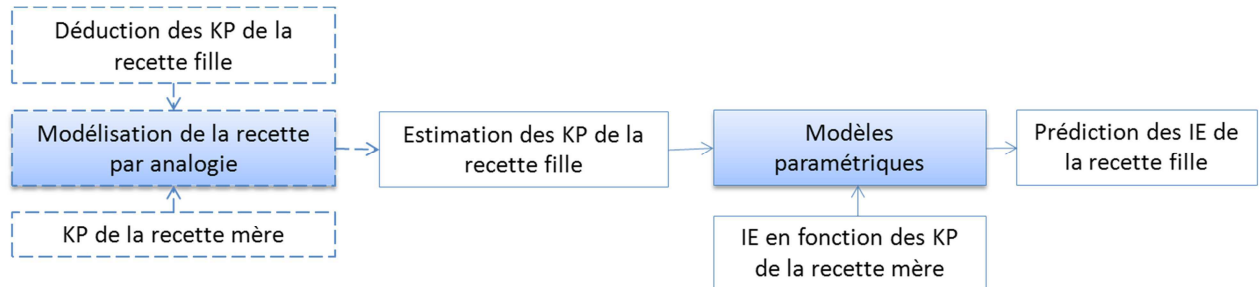


Figure 54 : ACV-simplifiée de niveau 4 d'une recette-fille avec possibilité de déduire les KP-L4 à partir d'une recette-mère

2.3 Démonstration de l'utilisation de l'outil sur un cas d'étude

Le cas d'étude porte sur l'étude d'un boîtier en conception de type BGA (« ball grid array »), appelé ϵ . Aucun prototype n'a été testé à ce stade de la conception.

- Détermination des boîtiers-parent

Le concepteur du boîtier, dans un premier temps, identifie les quatre boîtiers desquels ϵ est inspiré : α , β , γ et δ . Les boîtiers ont la même surface mais des caractéristiques différentes : épaisseur, nombre de connexions, technique de connexion de la puce (flip chip ou câblage filaire), diamètre des billes, site de production. Certains encapsulent plusieurs composants en même temps. Le boîtier ϵ a des caractéristiques communes avec ces boîtiers mais son assemblage est plus complexe car il est plus fin et possède un nombre de connexions plus important par unité de surface. Leurs caractéristiques sont comparées à celles de ϵ dans le Tableau 46.

Tableau 46 : Caractéristiques des boîtiers-parent comparées à celles de ϵ

	α	β	γ	δ
Surface	=	=	=	=
Pop ⁵⁴	≠	=	≠	=
Epaisseur	≠	≠	≠	≠
Nombre de billes	≠	≠	≠	≠
Diamètre des billes	=	=	=	=
Technique de connexion	≠	=	=	=
Pitch ⁵⁵	≠	≠	≠	≠

= : signifie que la caractéristique du boîtier-parent est identique de celle de ϵ

≠ : signifie que la caractéristique du boîtier-parent est différente de celle de ϵ

Une ACV est réalisée sur les quatre boîtiers. Les impacts environnementaux des procédés de fabrication sont enregistrés dans une base de données ainsi que leurs paramètres-clé.

- Construction du modèle du boîtier au niveau 3 pendant la revue de conception

Le chef de projet décrit la série de modules puis de procédés prévue pour l'assemblage du boîtier ϵ (Tableau 47). Dans un premier temps, le concepteur définit si le module requis existe déjà, si la technique d'assemblage est complètement nouvelle ou si le module existe déjà mais a dû être légèrement adapté pour le nouveau boîtier. Ensuite, pour chaque procédé au niveau 4, l'ingénieur en charge de l'étape précise le statut de la future recette de production qui sera utilisée pour l'assemblage du boîtier (existante, modifié, nouveau).

- *Module existant.* Un seul module existe déjà. Les impacts sont récupérés dans la base.
- Pour les autres, la construction du modèle est réalisée au niveau inférieur.
 - *Recette existante.* Pour six étapes, la recette existe déjà et est industrialisée dans plusieurs usines. L'ingénieur-procédé précise le boîtier-parent pour lequel la recette est déjà utilisée. Les impacts des recettes-mère sont récupérés dans la base.
 - *Recette nouvelle.* Pour deux étapes dont la technique de fabrication est inédite, l'ingénieur demande l'expertise d'un expert en ACV pour l'aider à réaliser l'étude environnementale du procédé à partir des informations qu'il possède déjà. L'expert en ACV aiguille le concepteur sur les paramètres à inventorier. Les procédés sont généralement en test sur la ligne-pilote donc l'ingénieur peut directement mesurer les flux entrants et estimer les futures caractéristiques du procédé une fois qualifié dans l'usine de production (par exemple le nombre de pièces par heure).
 - *Recette modifiée.* Si le procédé existe déjà mais qu'il doit être adapté, le concepteur utilise l'ACV-simplifiée de niveau 4. C'est ici le cas pour huit étapes.

⁵⁴ Un boîtier PoP (*Package on package*) utilise une méthode d'assemblage spécifique pour combiner verticalement des composants discrets logiques et un boîtier BGA. Les deux boîtiers sont placés l'un sur l'autre.

⁵⁵ Le pitch est la distance en millimètres entre deux billes.

Tableau 47 : Description de la chaîne d'assemblage du nouveau boîtier

Modules (L3)	Statut	Module-parent	Procédés prévus pour ε (L4)	Statut	Recette-mère
Substrat	Modifié	x	Fabrication du substrat	Modifié	β et δ
Traitement de la plaquette	Modifié	x	Polissage du wafer	Modifié	β ou δ
		x	Sciage du wafer	Modifié	α ou β ou δ
Double Ball attach	Nouveau	x	Soudure des billes (face avant)	Modifié	α, β, γ ou δ
		x	Nettoyage	Existant	β ou δ
		x	Ouverture laser	Nouveau	X
		x	Soudure des billes	Modifié	δ
		x	Marquage laser	Existant	α, β, γ ou δ
Flip chip	Nouveau	x	Bumping	Nouveau	X
		x	Chauffe du substrat	Existant	α, β, γ ou δ
		x	Flip chip	Modifié	β or δ
		x	Chauffe du substrat	Existant	α, β, γ ou δ
		x	Plasma	Existant	β ou δ
		x	Underfill	Modifié	β ou δ
Moulage	Modifié	x	Plasma	Existant	α, β, γ ou δ
		x	Moulage	Modifié	α
Finition	Existant	α, β, γ ou δ	x	x	x

- Construction du modèle du boîtier au niveau 4 avec l'ingénieur-procédé R&D

Les ingénieurs-procédé ont défini les paramètres-clé de chaque procédé, KP-L4, en s'assurant que ce sont des grandeurs communément utilisées et qui leur sont facilement accessibles. Une fois les paramètres-clé identifiés, les fonctions faisant varier les flux physiques de l'ICV (énergie, consommation de matières premières, émissions, déchets) sont définies. Une interface d'ACV-simplifiée au niveau 4 est disponible pour chaque famille de procédé.

Nous décrivons ici un exemple sur l'étape d'underfill. Dans l'interface, l'ingénieur précise trois KP-L4 : la résine underfill (sélectionne le matériau correct dans un menu déroulant), le nombre d'unités produites par heure et le gap qui correspond à la hauteur entre le substrat et la puce. Ces paramètres sont déduits de ceux de β ou δ ou estimés par l'ingénieur-procédé. Pour prédire l'impact de cette étape, la démarche est la suivante :

Estimation de la masse de résine-underfill utilisée, m (g) :

$$m = L * l * g * \mu \text{ (res)} \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} L &: \text{longueur du composant (mm)} \\ l &: \text{largeur du composant (mm)} \\ g &: \text{gap (mm)} \\ \mu \text{ (res)} &: \text{masse volumique de la résine (g/mm}^3\text{)} \end{aligned}$$

Estimation de la consommation d'électricité par l'équipement pendant la fabrication, E (kWh) :

$$E = P / UPH \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} P &: \text{la puissance en production de l'équipement (kW)} \\ UPH &: \text{le nombre d'unité produits par heure} \end{aligned}$$

Estimation de l'impact environnemental de la recette d'underfill $IE(P)$:

$IE(P) = m * IE(res) + E * IE(mix)$ avec $IE(res)$: impact unitaire de la résine (unité d'impact / kg)⁵⁶
 $IE(mix)$: impact unitaire du mix énergétique du pays de production (unité d'impact / kWh)

- Résultats de l'évaluation environnementale

Les résultats générés par *Green-STAMP* sont présentés à l'équipe de conception :

- le nouveau boîtier comparé aux anciennes générations (Figure 55) ;
- un Pareto présentant les performances relatives des étapes de fabrication du boîtier ε (Figure 56). Les deux figures montrent les résultats pour l'indicateur « réchauffement climatique » mais les mêmes graphes sur les autres IE sont présentés.

A partir de l'outil et des résultats générés, le concepteur est capable d'appréhender le futur impact environnemental du boîtier, de comprendre quelles sont les sources de pollution et pourquoi les nouvelles générations sont plus polluantes que les anciennes. Il acquiert les connaissances sur les performances de sa conception lui permettant de faire des choix pour l'améliorer d'un point de vue environnemental. Les impacts d'un boîtier sont connus plusieurs mois avant l'industrialisation.

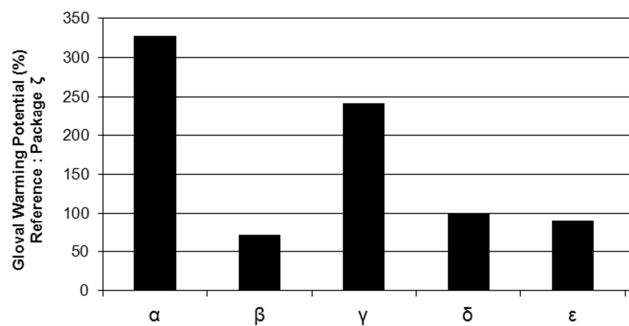


Figure 55 : Performances environnementale du boîtier ε et de ses boîtiers-parent

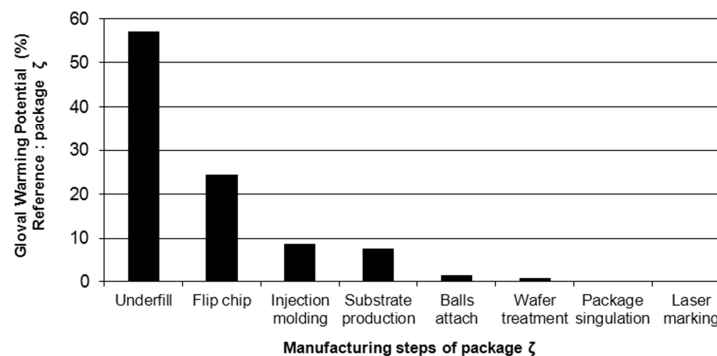


Figure 56 : Evaluation environnementale au niveau 3 pour le boîtier ε

2.4 Perspectives pour l'intégration future de l'outil *Green-STAMP*

Il était attendu du prototype *Green-STAMP*, de montrer qu'il est possible de considérer systématiquement des critères environnementaux dans la conception de boîtiers. L'expérience fut

⁵⁶ L'impact unitaire de la résine comprend la fabrication de la résine, son transport jusqu'à l'usine de production et son élimination sur le site selon un scénario d'utilisation moyen où 30% du volume de résine restant sur le produit est gaspillé, rincé dans l'équipement puis traité avec les effluents liquides.

concluante d'un point de vue théorique, puisque la mise en œuvre sur un cas d'étude a permis d'en prouver la faisabilité.

Premièrement, les impacts environnementaux générés par la fabrication de plusieurs boîtiers ont été calculés avec la méthodologie d'ACV : les résultats mis en avant sont des informations jusqu'alors inconnues des équipes de conception. Deuxièmement, elle a prouvé que l'analyse environnementale d'un boîtier encore en conception est possible. L'outil s'est révélé être adapté au besoin initialement formulé. L'utilisation d'hypothèses simplificatrices (conception par analogie, modèles paramétriques sur plusieurs niveaux) a été appréciée.

Les modèles paramétriques sont valables pour des boîtiers de type BGA. Même si il existe des similitudes entre les familles de boîtier, chaque famille utilise potentiellement des techniques d'assemblage, des matériaux ou des équipements non utilisés pour l'assemblage de boîtiers BGA. Des modèles paramétriques doivent donc être développés pour les procédés non modélisés.

Le support des équipes de production requis est assez limité pour ce type d'étude, alors qu'on l'a vu pour la fabrication de la puce leur mobilisation est fondamentale. L'ingénieur R&D procède à l'installation des équipements dans les zones de production donc en connaît les caractéristiques (puissance, nombre de substrats chargés dans l'équipement). Toutes les nouvelles substances utilisées en production sont qualifiées par les équipes R&D. Toutefois, une bonne connaissance des performances environnementales du site est essentielle. Pour la création des modèles de consommations des matériaux, il faut inventorier les espèces traitées et les rendements des unités de traitement d'air, des stations de traitement des eaux usées respectivement pour chaque espèce.

3 Green-STEP : un outil d'éco-conception pour les concepteurs de circuit intégré

3.1 Fonctionnalités et utilisation

Green-STEP est destiné à être utilisé à différents stades de la conception. Les fonctionnalités disponibles sont : l'évaluation environnementale du circuit avec de l'ACV (simplifiée et complète), l'aide à la conception avec l'exploitation des résultats d'ACV et l'utilisation de guidelines en conception et enfin la mise en conformité du produit final en considérant les aspects réglementaires (Figure 57). Ils permettront de donner les informations nécessaires au concepteur pour évaluer le circuit tel qu'il est prévu d'être conçu et trouver des options d'amélioration.

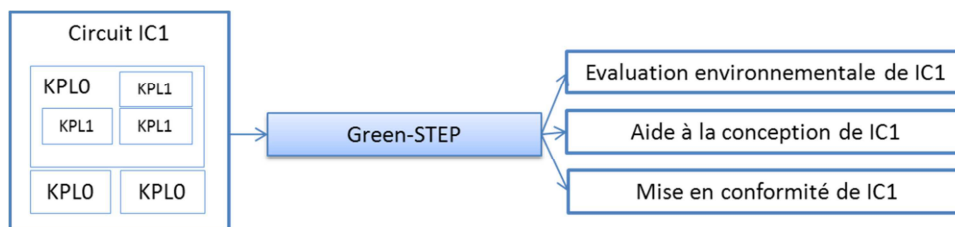
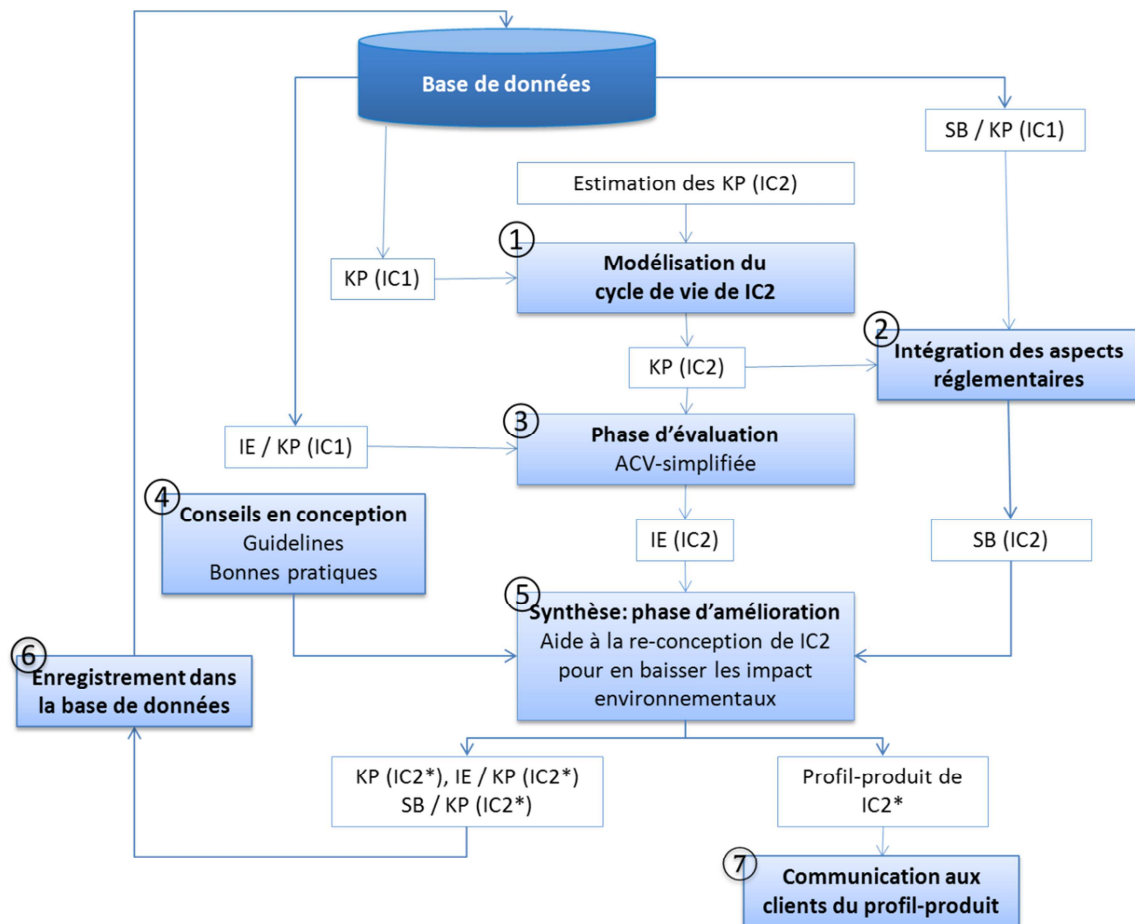


Figure 57 : Fonctionnalités de *Green-STEP*

La Figure 58 illustre le fonctionnement de la méthodologie embarquée dans *Green-STEP* sur un circuit intégré IC2 inspiré d'IC1. Par rapport à *Green-STREAM*, une étape supplémentaire (étape 7) est réalisable : pour répondre aux requêtes des clients, nous proposons de délivrer le profil-produit dès la mise sur le marché. *Green-STEP* permet l'édition du document unique (chapitre 10).

Figure 58 : Fonctionnement de *Green-STEP*

3.2 Outil d'évaluation par ACV-simplifiée

L'ACV-simplifiée est utilisée à deux fins : la prédiction des impacts environnementaux du futur circuit lors des phases de conception et la vérification des informations environnementales calculées pendant la conception. La modélisation du cycle de vie d'un circuit avant l'ACV-simplifiée n'est pas systématiquement réalisée à partir d'une construction par analogie.

3.2.1 Description des scénarii couverts et modélisation du cycle de vie appropriée

La méthode embarquée dans *Green-STEP* permet l'évaluation environnementale sur le cas le plus commun : l'équipe-projet définit le concept d'un circuit et sélectionne une technologie et un boîtier existants qui ne requièrent pas de développement ultérieur. Les impacts du circuit sont calculés en récupérant les scores environnementaux du boîtier et de la puce. La plateforme aura alors été utilisée plusieurs mois auparavant avec *Green-STREAM* et *Green-STAMP*. L'articulation des outils dans la plateforme au travers de la base de données centrale s'avère indispensable.

Cependant, comme c'est généralement le cas lorsque le cahier des charges fonctionnel est exigeant, aucune technologie⁵⁷ disponible ne permet de supporter le circuit. Alors le développement du circuit et des technologies sont concomitants. La méthodologie permet de gérer ce cas-là en proposant des méthodes d'ACV-simplifiée pour l'évaluation de la matérialisation. Cette technique

⁵⁷ Dans ce tableau, le terme technologie désigne à la fois la technologie de la puce et le boîtier

permet de gérer les technologies fabriquées en sous-traitance pour lesquelles l'obtention de données d'impacts n'est pas assurée. Le Tableau 48 présente les différents scénarii et la conséquence sur l'utilisation de l'outil.

Tableau 48 : Scénarii couverts par *Green-STEP* et modélisation adéquate

Scénario	Description du scénario	Conséquence sur l'utilisation de <i>Green-STEP</i>
Scénario 1	Le circuit est en production. Les IE des technologies sont stockés dans la base.	C'est le cas le plus simple. Le concepteur utilise l'interface A.
Scénario 2	Le circuit est en production. Les IE des technologies n'ont pas été calculés.	Le concepteur utilise l'interface A ou B. Le choix est fait selon ses connaissances et le temps qu'il peut allouer à cette tâche.
Scénario 3	Le circuit est en production. La fabrication est sous-traitée.	Le concepteur utilise l'interface B.
Scénario 4	Le circuit est en cours de conception. Les IE des technologies sont stockés dans la base.	Le concepteur utilise l'interface A. La consommation et la taille du circuit sont estimées.
Scénario 5	Le circuit est cours de conception, mais les technologies sont déjà développées. Les IE des technologies n'ont pas été calculés.	Le concepteur utilise l'interface A ou B. Le choix est fait selon ses connaissances et le temps qu'il peut allouer à cette tâche. Certaines données, relatives à la fois aux technologies et au circuit sont estimées.
Scénario 6	Le circuit est cours de conception. Les technologies sont déjà développées mais la fabrication est sous-traitée.	Le concepteur utilise l'interface B. La consommation et la taille du circuit sont estimées.
Scénario 7	Le circuit est cours de conception, ainsi que les technologies.	C'est le cas amenant le plus d'incertitude. Le concepteur utilise l'interface A ou B selon son niveau de connaissances.

La qualité de l'évaluation dépend du niveau de connaissance du produit qui lui-même dépend du stade de la conception, mais aussi si la fabrication est sous-traitée ou non. D'autre part, si les technologies ont été évaluées par *Green-STREAM* et *Green-STAMP*, les performances environnementales sont stockées dans la base, ce qui facilite l'évaluation du produit.

Selon le scénario, le concepteur est amené à prendre différentes décisions pour évaluer les performances de son produit, en ayant recours ou non à la construction par analogie. Nous appellerons « interface A » l'interface n'utilisant pas d'objets-parent pour l'ACV-simplifiée et « interface B » l'interface utilisée par le concepteur lorsque la modélisation est faite par analogie.

- [Interface A : Modèles paramétriques et synchronisation avec *Green-STREAM* et *Green-STAMP*](#)

L'interface intégrant ce principe est utilisée principalement pour générer le profil-produit destiné aux clients. Comme le produit est en production, les impacts de la puce et du boîtier peuvent être évalués et stockés dans la base. L'ACV-simplifiée n'utilise pas de construction par analogie : les impacts environnementaux des technologies sont récupérés dans la base de données et l'énergie en utilisation est estimée selon un scénario moyen d'utilisation. La valeur stockée dans la base de

données par boîtier est paramétrée par le nombre de connexions électriques et l'impact de la technologie est divisé par le nombre de puce par plaquette.

Si toutefois les technologies n'ont pas été évaluées, il existe des modèles paramétriques de plusieurs niveaux, c'est-à-dire que le concepteur choisit d'évaluer son produit à partir des paramètres-clé du niveau L0 ou de niveaux inférieurs, L1, L2, etc. En effet, la connaissance sur le produit final peut être très inégale selon le stade de la conception et le scénario.

L'évaluation d'une technologie en conception par les concepteurs de circuit ne peut être aussi précise que si elle était réalisée directement par l'expertise d'un technologue (respectivement par le concepteur de boîtier pour l'évaluation du boîtier). Le technologue possède plus d'informations que le concepteur de circuit sur la future technologie et de par son expérience peut anticiper sur la construction du modèle et la valeur que prendra chaque KP-L3 c'est-à-dire les modules (respectivement les étapes de fabrication pour le boîtier). Bien qu'elles collaborent étroitement pendant la conception, les équipes sont distinctes de par l'organisation dans l'entreprise.

Dans le cahier des charges de la méthodologie, il est souhaité que le concepteur soit autonome dans l'utilisation de l'outil orienté-métier. C'est pourquoi l'analyse environnementale des technologies et des boîtiers en développement lors de la phase de 'Conceptual Design' est différente que si elle était réalisée par les experts de la conception de ces objets. En pratique, la modélisation du cycle de vie du circuit est adaptée aux connaissances des équipes de conception de circuit c'est-à-dire que le concepteur peut choisir d'utiliser indifféremment des paramètres-clé adaptés de niveaux L2 et inférieurs pour l'évaluation du même KP-L1. L'impact du circuit se calcule alors comme suit :

Pour j allant de 1 à 7, où j représente un des sept indicateurs d'impacts présélectionnés

$$IE/C_j(IC1) = \sum_{i=1}^m IE/C_j[KPi-L0(IC1)] + \sum_{i=1}^n IE/C_j[KPi-L1(IC1)] + \sum_{i=1}^p IE/C_j[KPi-L2(IC1)]$$

avec

- $IE/C_j(IC1)$ est l'impact environnemental du circuit $IC1$ sur la catégorie d'impact C_j
- les $KPi-L0(IC1)$ sont des paramètres-clé de niveau 0 du circuit $IC1$
- les $KPi-L1(IC1)$ sont des paramètres-clé de niveau 1 du circuit $IC1$
- les $KPi-L2(IC1)$ sont des paramètres-clé de niveau 2 du circuit $IC1$
- m est le nombre de paramètre-clé de niveau 0 pertinents pour l'évaluation
- n est le nombre de paramètre-clé de niveau 1 pertinents pour l'évaluation
- p est le nombre de paramètre-clé de niveau 2 pertinents pour l'évaluation

- [Exemple d'un modèle de prédiction de niveaux inférieurs intégré dans l'interface A](#)

Le Tableau 49 présente un exemple de modèle de prédiction de bas niveau, niveau L2, pour le calcul de la consommation d'énergie par le circuit lors de son utilisation. Les performances énergétiques d'un produit en utilisation sont susceptibles d'évoluer au fur et à mesure de la conception bien qu'une plage de valeurs soit fixée dans le cahier des charges. Le concepteur saisit les puissances en utilisation pour l'ensemble des modes préconisé par le fabricant de l'application finale. L'indication sur la localisation de l'utilisateur donne l'information sur l'impact sur l'environnement associé au mix énergétique du pays en question.

Tableau 49 : Paramètres-clé de niveau L2 pour le calcul de l'impact en utilisation

Mode	Power (W)	Time (%)
Communication		26
Video Playback		25
Video & Image capture		22
Internet 3G		14
Navigation		5
Gaming		4
Music Playblack		2
Fidding		2
Other parameters	Value	
Standby Power (W)	0.00599	
Standby Duration (h/day)	12.000	
Life span (years)	2	
User location	Europa	

- [*Interface B : Modèles paramétriques et construction du modèle de cycle de vie par analogie et ACV simplifiée*](#)

Dans ce deuxième cas, le principe de l'évaluation environnementale est le même que celui de *Green-STREAM* et *Green-STAMP*. Le concepteur décrit les caractéristiques macroscopiques du circuit à partir de circuits-parent et l'évaluation des performances environnementales d'un produit se fait grâce à l'incorporation de modèles paramétriques à partir de caractéristiques macroscopiques.

Le principe de l'évaluation consiste à extrapoler les impacts d'un produit en fonction de ses objets-parent. Comme pour l'interface A, les modèles prédictifs par analogie sont disponibles sur plusieurs niveaux en fonction du niveau de connaissance du concepteur mais aussi du temps qu'il prend pour l'évaluation. Plus le niveau d'évaluation est faible, plus le concepteur doit récolter des informations qu'il ne connaît pas immédiatement. Le concepteur de circuit a deux options :

- demander au technologue et au concepteur de boîtier de réaliser pour lui une analyse environnementale avec les outils-métier dédiés ; le cas échéant, la base de données sera actualisée avec l'estimation des scores environnementaux des technologies et boîtier par les experts ; on revient au scénario 1 ou 4 ;
- être autonome dans l'analyse et sélectionner un niveau d'évaluation adapté à ses propres connaissances sur la technologie et le boîtier.

Des modèles de construction par analogie de niveau élevé (niveau L0 et L1) sont nécessairement moins précis et peuvent donner lieu à une erreur critique.

- [*Exemples de modèles de prédiction par analogie intégrés dans l'interface B*](#)

Des modèles de plus haut-niveau sont utilisés lorsque la connaissance du produit est faible (scénario 3 ou 7). Bien que le risque d'erreur soit élevé, le recours à ces modèles permet une estimation des impacts à partir de peu de données, comme le montrent les exemples ci-dessous.

Une famille de boîtier de type VFBGA a été étudiée : les performances environnementales de ce type de boîtier ont été évaluées, on en connaît les caractéristiques, les KP, et les impacts associés.

Un modèle paramétrique a été élaboré en faisant l'hypothèse que les impacts varient principalement selon les propriétés du composant à encapsuler : taille et nombre de connexions. En renseignant ces deux valeurs, le concepteur calcule l'impact d'un boîtier d'une génération future dont la taille est généralement plus faible et le nombre de connexions plus important.

Pour l'évaluation d'une puce dont la fabrication est faite en sous-traitance, donc pour laquelle peu d'informations sont disponibles, le concepteur précise deux paramètres de niveau L1 :

- la localisation de la fonderie, pour récupérer le mix énergétique du pays ;
- le nombre de masques supposé de la technologie. Le concepteur récupère cette donnée de la technologie-mère.

3.2.2 Cas d'étude sur un dispositif dédié à des téléphones portables

Le cas d'étude porte sur un dispositif microélectronique dédié à un téléphone portable, formé de quatre composants actifs. Sur les quatre composants :

- trois composants (C1, C2 et C3) sont fabriqués par l'entreprise sur cinq sites différents ;
- la fabrication du composant C4 est sous-traitée (le nombre de masques est inconnu) ;
- une seule puce (celle de C1) et deux boîtiers (C1 et C2) avaient d'ores et déjà été évalués et stockés dans la base de données.

Ce cas d'étude a permis de mettre au point l'interface et d'en vérifier le fonctionnement avec une équipe de conception. Les informations requises pour évaluer le système sont décrites dans le Tableau 50. Elles sont accessibles dans les documents usuellement utilisées ou extraites depuis la base de données de *Green-ST*. Pour évaluer l'empreinte des composants, les hypothèses faites sont résumées dans le Tableau 51.

Tableau 50 : Informations récoltées pour l'évaluation environnementale du dispositif

Sources	Items
ERP ⁵⁸	Sites de fabrication et de test ; Clients (localisation, ventes pour décrire l'utilisateur) ; Technologies (composant et boîtier) ; Nombre de puces par plaquette ; Emballage
Datasheet	Puissance des composants en utilisation ; Nombre de connexions ; Taille
Material déclaration	Masse des composants ; Matières restantes sur les composants
Etudes statistiques	Scénario d'utilisation d'un téléphone ; Scénario de fin de vie d'un téléphone
Base de données <i>Green-ST</i>	IE / masque sur les sites de fabrication des technologies de B et C ; IE d'une technologie proche de celle de D ; paramétrage du pays de production ; IE / pin / cm ² d'un boîtier de la même famille que le boîtier de C ; IE d'un boîtier de la même famille que celui de ; paramétrage possible des matériaux utilisés pendant la fabrication et du pays de production ; IE / KWh des mix énergétiques

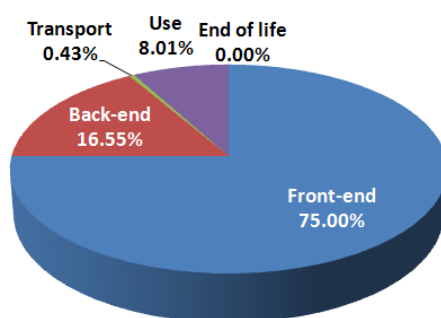
⁵⁸ Enterprise Ressources Planning. Ce type de logiciel correspond au support de base d'une organisation capable d'assurer une « gestion intégrée », définie comme étant l'interconnexion et l'intégration de l'ensemble des fonctions de l'entreprise dans un système informatique centralisé.

Tableau 51 : Description des paramètres-clé pour la construction du modèle du cycle de vie du dispositif

Phases		Inter- face	Nature de l'objet- parent	Paramètres-clé
Fabrication du semi-conducteur	Scores dans la base (C1)	A	x	IE de la technologie
	Non évaluée (C2, C3)	B	Technologie moyenne fabriquée sur le même site c'est-à-dire que l'impact total est alloué par nombre de masques	Nombre de masques, nombre de composants par plaquette
	Sous-traitée (C4)	B	Technologie dont le nœud technologique est identique	Mix énergétique du site de production*, nombre de composants par plaquette
Assemblage du boîtier	Scores dans la base (C1, C2)	A	x	IE du boîtier
	Non évalué (C3)	B	Boîtier de la même famille (ex : PBGA, QfN)	Taille, nombre de connexion
	Sous-traité (C4)	B	Boîtier de la même famille fabriqué en interne	Taille, nombre de connexions, matières restantes sur le boîtier, mix énergétique du site
Distribution (transport et emballage)		A	x	Taille et masse des composants, localisation des sites et du client
Utilisation		A	x	Puissance par mode, scénario d'utilisation d'un téléphone
Fin de vie		A	x	Masse des matières restantes, scénario d'élimination d'un téléphone (répartition par filière des DEEE)

*Le mix énergétique du site de production est lié au KP-L2, localisation du site.

Les performances environnementales ont pu être déterminées. La Figure 59 présente l'impact sur le réchauffement climatique des phases du cycle de vie du dispositif.

**Figure 59 : Répartition des impacts du dispositif sur les phases du cycle de vie (réchauffement climatique)**

L'évaluation du dispositif a été réalisée quelques mois avant son lancement en production : les paramètres-clé étaient donc figés. La précision des modèles pour l'évaluation de la matérialisation est moindre que dans les outils-experts *Green-STREAM* et *Green-STAMP* car il a fallu s'adapter aux informations connues par l'équipe-projet concevant le circuit qui ne sont pas aussi précises que celles des ingénieurs concevant les boîtiers. On se plaçait dans des situations de scénario 1, 2 et 3.

La perspective à ces travaux est de faire évoluer les modèles pour qu'ils soient appropriés à l'évaluation d'un produit moins mature. Par exemple, la masse des matériaux n'est connue des ingénieurs qu'une fois la « material declaration » officiellement fournie avant la mise sur le marché. Cette difficulté est contournée grâce à la mise en place de modèles paramétriques permettant le calcul de ces masses en fonction d'autres paramètres connus avant la fin de la conception.

3.3 Guidelines

3.3.1 Guidelines de niveau L1 : intégration à la conception d'une checklist

Grâce à la caractérisation environnementale d'un produit microélectronique décrite dans la Partie II, la définition du produit éco-conçu a été dressée. Il s'agit d'un produit pour lequel on a eu une vision « cycle de vie » pendant le développement. Six piliers ont été retenus : ce sont les KP-L1 auxquels on donne une définition précise (Tableau 52).

Tableau 52 : Guidelines de niveau L1

KP-L0	KP-L1	Définitions
Matérialisation (y compris l'emballage)	Matériaux	Sélectionner des matériaux moins polluants afin de diminuer l'impact de la chaîne d'approvisionnement, de favoriser de nouveaux procédés de fabrication moins polluants, de ne pas utiliser des substances dangereuses
	Procédés	Sélectionner des procédés peu polluants afin de diminuer l'impact de la fabrication
	Dimensions	Réduire la taille et le volume, réduire le nombre de composants
Energie utilisée dans l'application	Concept	Définir un concept dont les impacts sont faibles Augmenter les fonctionnalités du produit
	Puissance du circuit	Diminuer la consommation du produit dans son scénario d'utilisation classique.
Stratégie industrielle	Application	Favoriser des applications responsables Sélectionner des segments de marché respectueux des principes du développement durable
	Sites de fabrication et de test	Choisir les sites en fonction de critères environnementaux Sélectionner des sites de fabrication certifiés ISO14001, respectant les codes du droit du travail Favoriser un site avec de bonnes performances environnementales Favoriser des sites proches pour limiter les transports

Les guidelines liées au niveau L1 ne sont pas spécifiques à un métier et ne permettent pas d'éco-concevoir le produit. Elles servent plutôt de vérification. Ainsi, une checklist spécifique pour les produits a été mise au point : c'est une reformulation de ces guidelines dont la considération est

systématique puisque rendue obligatoire. Les checklists sont reportées dans l'Annexe 6. Lors des différentes phases de transition du processus de conception, l'équipe-projet, via son responsable qualité, devra répondre sur les performances du nouveau produit sur six thématiques : la structure, l'énergie, les substances dangereuses, l'emballage, la stratégie industrielle. L'ensemble des KP-L1 seront également repris mais sous une forme légèrement différente. Les réponses utilisent des données connues ou très facilement accessibles.

Les performances, chiffrées ou non, seront comparées d'une génération de produits à l'autre. Cette checklist a ainsi deux rôles : mesurer les progrès d'une génération à l'autre de produits et assurer que les concepts d'éco-conception soient connus par les équipes-projet.

3.3.2 Guidelines de niveaux inférieurs

Pour mettre au point les guidelines-métier les plus appropriées aux concepteurs de circuit, nous avons déterminé les guidelines qui permettraient de couvrir les KP-L2 s'ils sont de la responsabilité du concepteur de circuit ou sinon de niveaux inférieurs (Tableau 53).

Tableau 53 : Paramètres-clé KP-L2 de la responsabilité de l'équipe-projet concevant le circuit

KP-L2	Responsabilité	Guidelines correspondantes
Substances concernées par RoHS	x	x
Alliages délétères pour le recyclage	x	x
Fabrication des matériaux	x	x
Approvisionnement	x	x
Procédés d'assemblage	x	x
Route de fabrication (intégration)	x	x
Surface du composant	oui	Diminuer la taille du composant
Surface du boîtier	oui	Sélectionner un boîtier de taille minimale
Nœud technologique	oui	Préférer une technologie dont l'impact est faible
Famille du boîtier	oui	Préférer un boîtier dont l'impact est faible
Fonctionnalités	non	x
Séquençage des tâches	oui	Optimiser le séquençage pour diminuer la consommation
Puissance des modes	oui	Diminuer la consommation des modes
Application responsables	non	x
Localisation des sites	non	x
Sites certifiées ISO14001	non	x

* responsabilité, directe ou indirecte de l'équipe projet, sur la fixation du KP-L2 correspondant

Les guidelines, comme celles de Synergico [Bonvoisin'10] qui ont fait leur preuve sur des produits électroniques, ne sont pas applicables aux produits microélectroniques. Elles ont été présentées aux concepteurs et il semble que les efforts faits en conception pour l'efficacité énergétique sont déjà très en avance car c'est une problématique centrale du secteur. La réduction de la taille est l'autre paramètre qui influe la conception, mais c'est aussi une thématique centrale de la conception : l'utilisation de guidelines n'est donc pas suffisante.

En conclusion, l'ajout de guidelines-métier n'a pas encore démontré son intérêt dans notre expérience mais le partage des bonnes pratiques sur le « Low Power Design » est une perspective intéressante qui peut donner lieu à des investigations par les spécialistes.

4 Retour sur expérience, perspectives et conclusion

Un retour d'expérience permet d'évaluer le niveau d'intégration lors de la fin des travaux de thèse. La mesure de la diffusion de l'éco-conception dans l'entreprise, comme proposée dans la partie 1.2 du Chapitre 10, est prématurée car aucun déploiement n'a été réalisé en dehors des équipes-pilote. Toutefois, ces expérimentations permettent de suggérer des approches pour le déploiement d'une démarche d'éco-conception dans une entreprise du secteur microélectronique.

4.1 Etat des lieux de l'intégration de l'éco-conception et du développement de la plateforme

4.1.1 Développement de la plateforme et étapes manquantes

A la fin des travaux de thèse, certains éléments décrits dans ce chapitre ont été testés sur des équipes-pilote mais quelques pans de la méthodologie n'ont pu être mis en œuvre (Figure 60).

Le premier manque est relatif aux guidelines. L'élaboration de guidelines, à intégrer en conception, est un processus itératif où des résultats marquants initialement issus de l'expérience des concepteurs sont cascadés à l'ensemble des équipes de conception. Aujourd'hui la maturité des concepteurs et la dissémination des concepts d'éco-conception sont beaucoup trop faibles pour avoir dès à présent ce type de résultats. Toutefois, ce principe de guidelines a fait ses preuves dans d'autres entreprises : leur développement est donc une étape ultérieure importante. Par ailleurs, aucun objectif environnemental n'a encore été intégré à la conception. Ce virage sera pris dès lors qu'un engagement fort des fonctions dirigeantes sera communiqué et que les aspects environnementaux donneront lieu à une standardisation.

Pour l'éco-conception de boîtier, l'évaluation environnementale a été prise en compte au contraire des aspects méthodologiques. Etant donné que la faisabilité a été établie lors de la conception de technologie semi-conductrice, ces éléments n'ont volontairement pas été testés.

Finalement, le système de veille réglementaire et de mise à jour des outils fournissant des certificats de conformité est indépendant car non-intégré dans la plateforme. Ce lien est faisable par le développement d'outils informatiques.

		Green-STREAM Technologie	Green-STAMP Boitier	Green-STEP Circuit
Conceptual Design	Objectifs stratégiques	■	■	■
	Guidelines	■	☒	■
	Checklist	■	■	■
Emdodiment	ACV-simplifiée	■	■	■
	Checklist	■	■	■
Detail Design	ACV complète / simplifiée	■	■	■
	Checklist	■	■	■
Production	ACV complète	■	■	■
	Plateforme collaborative	■	■	■
	Veille réglementaire	■	■	■

■ Testé par une équipe pilote ■ Non testé ☒ Non prévu par la méthodologie

Figure 60 : Eléments méthodologiques testés par des équipes-pilote

4.1.2 Attentes des utilisateurs

Dans cette partie, il s'agit de vérifier que les outils de *Green-ST* répondent aux objectifs fixés et aux prérequis pour l'optimisation des chances d'appropriation par l'utilisateur. La technique de co-développement des outils a permis de développer une plateforme en phase avec les attentes des concepteurs et des outils adaptés à leurs spécificités mais l'apparition d'un biais lors de la mise en œuvre n'est pas impossible. On vérifie que l'outil répond aux prérogatives des utilisateurs dressées par [Lindahl'06] [Lofthouse'06] [LePochat'03] en réalisant des interviews. Les interviews ont été réalisées sur l'outil Green-STREAM car c'est le seul à avoir été développé sur un support informatique. Les points faibles et forts de la plateforme à ce stade sont résumés dans le Tableau 54.

Les points faibles recueillis lors de ce retour d'expérience sont relatifs à deux points :

- la collecte des données en environnement industriel ressort comme une contrainte majeure ;
- le temps à accorder à l'utilisation de l'outil dans le cadre de la conception. Bien que l'outil réponde aux exigences de base, son utilisation à terme volontaire dans le cadre strict de la conception n'est pas assurée et apparaît plutôt comme une information plutôt qu'une aide à la conception ;
- la sensibilisation (accessibilité, informations contenus) des utilisateurs avant l'utilisation. De notre interprétation, il semble que les utilisateurs reprochent à l'outil son indépendance par rapport aux autres programmes de l'entreprise et le manque de vision sur l'utilisation des résultats à l'échelle de l'entreprise.

Tableau 54 : Résultats des interviews des utilisateurs de Green-STREAM

	Attentes des utilisateurs	Réponse
[Lofthouse'06]	Un service facile (orientation, information et sensibilisation)	
	Contient de l'information et stimuli	
	Permet une bonne visualisation des résultats	
	Adapté au langage de l'entreprise	
	Est accessible en termes de contraintes de temps	
[Le Pochat'03]	La prise en main de l'outil ne nécessite pas d'expert	
	L'interprétation des résultats ne nécessite pas d'expert	
[Lindahl'06]	Facile de comprendre les objectifs	
	Facile de comprendre le fonctionnement	
	Ajustable	
	Temps appropriation court	
	Ne nécessite pas beaucoup de coopération	
	Accessibilité des données d'entrée	
	Outil informatique	
	Restitution de résultats adaptés au stade de la conception	

4.2 Perspectives pour l'intégration de démarches d'éco-conception dans l'entreprise

4.2.1 Implication des acteurs du cycle de vie

Comme soulevé précédemment, l'inventaire des données représente une barrière importante à la pratique de l'ACV en microélectronique. Selon [Baudry'12], l'amélioration de l'impact global d'une industrie est étroitement liée à la qualité de la mesure : « un bon contrôle ouvre des portes pour l'amélioration ». La collecte de données dans une usine soulève d'importantes difficultés du fait de la quantité d'étapes de production et de la mixité des composants fabriqués simultanément.

La problématique de collecte des données et leur agrégation pour des objectifs environnementaux est en elle-même un sujet qui mérite des éclaircissements et fait ainsi l'objet de recherches depuis de nombreuses années [Schischke'01] [Murphy'03-b] [Krishnan'08] [Baudry'12]. Dans ces travaux, la difficulté dans la collecte de données a été définie comme une contrainte à intégrer dans les cahiers des charges et non comme un sujet de recherche. L'ensemble de la communauté scientifique a déjà alerté les industriels sur ces difficultés et de nombreux groupes de travail ont débuté ces dernières années : le Sustainable Consortium⁵⁹, un groupe de l'ITU et un autre au sein de de l'Union Européenne pour développer l'ILCD Handbook⁶⁰.

D'une part, de nombreux matériaux utilisés pendant la fabrication sont spécifiques de ce secteur d'activité : colle, résine de moulage, underfill, silicium, slurries etc. Les compositions de ces matériaux sont quelquefois protégées par le secret industriel et les fournisseurs n'ont pas d'informations fiables sur l'impact de leur production.

⁵⁹ www.sustainabilityconsortium.org/

⁶⁰ International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance, European Commission, 2010, Dictus publishing

D'autre part, une partie importante de la production des boîtiers est sous-traitée. L'analyse environnementale est forcément approximative puisqu'on ne connaît pas précisément les performances des usines, ni l'utilisation de leurs ressources. Par exemple, il existe des systèmes de recyclage de l'eau ultra-pure témoignant de la haute performance environnementale des usines. Ce n'est pas le cas de toutes les usines des sous-traitants, les performances d'une usine étant fortement variables selon la culture de l'entreprise et l'implantation géographique, la sévérité des réglementations étant variable selon le pays.

Cette faiblesse de qualité des données est forcément problématique pour la poursuite du projet. Un processus de renforcement des informations en provenance des fournisseurs et sous-traitants doit être mis en place. Des questionnaires destinés aux sous-traitants et fournisseurs relatifs à l'empreinte environnementale par unité de production devraient permettre de consolider ces points faibles. Il est à noter que nous avons envoyé de tels questionnaires aux principaux fournisseurs (substrat, résines, silicium) : les réponses ont été positives mais du fait de la disparité dans la méthodologie de divulgation des résultats, nous n'avons pu intégrer ces réponses à notre étude.

Pour [Grisel'04], les méthodologies d'ACV sont en expansion, la pérennité viendra par la fiabilité des conclusions. Nous pouvons en conclure que, certes à l'heure actuelle les résultats des ACV sont critiquables et soumis à une importante marge d'erreur mais les communautés scientifiques et industrielles travaillent conjointement pour faire évoluer les connaissances et fiabiliser l'ACV.

4.2.2 Développer une culture d'éco-conception dans l'entreprise

Pour l'évaluation des produits, les concepteurs ne sont pas les seuls acteurs à mobiliser. On l'a dit, le support requis des équipes de production de boîtier reste assez limité car les ingénieurs R&D ont une assez bonne connaissance des équipements et des recettes car ils développent les procédés sur des lignes-pilote. Pour la fabrication d'une puce, leur mobilisation est fondamentale car les prototypes sont fabriqués directement dans des usines de production. Les équipes à mobiliser dans une entreprise pour la mise en place d'une politique intégrée de produits sont nombreuses. La difficulté est que certaines de ces organisations ne sont pas actrices de l'éco-conception mais ont seulement pour rôle de fournir des données : leur implication est plus difficile à obtenir.

Le développement d'une culture d'éco-conception, justifiant la sollicitation des équipes pour ce projet, permet de faciliter les échanges entre les experts éco-conception et ACV et les équipes détentrices des données à collecter. La mise en place d'indicateurs pour la récolte est envisageable. L'Annexe 7 décrit les indicateurs suggérés.

4.2.3 Investissements financiers et humains

L'introduction de ressources, financières et humaines a été soulevée comme un prérequis avant toute intégration dans les équipes R&D.

En premier lieu, comme défini dans le cahier des charges, un expert ACV doit être en mesure d'aider l'ingénieur lorsqu'un nouveau procédé est mis au point puis de développer les modèles paramétriques associés. La plateforme nécessite des mises à jour permanentes : introduction de nouvelles matières, enregistrement des impacts et paramètres-clé des nouveaux objets.

Deuxièmement, l'outil ne peut fonctionner que si un nombre conséquent d'objets (produit, boîtier et technologie) est modélisé dans la base de données. Plus le nombre d'objets modélisés

dans la base de données est important, plus l'analyse des nouveaux objets sera rapide puisque la plupart des configurations sont décrites par un modèle paramétrique adapté. La mise à jour de la base de données nécessite le support de techniciens.

Finalement, la plateforme d'éco-conception n'a d'intérêt que si les résultats sont analysés et que des plans d'actions sont mis en place, dans un premier temps selon une démarche volontaire. L'accès aux résultats doit être simple et la plateforme engageante : un développement informatique adéquat, via une application web, est nécessaire pour passer le cap d'appropriation par l'utilisateur. Une partie de la plateforme, l'outil associé à la méthode *Green-STREAM*, a d'ores et déjà été développée. Toutefois, l'industrialisation d'une telle application nécessite des ressources financières, notamment pour l'exploitation de bases de données et l'hébergement sur un serveur.

Conclusion générale

Dans ces travaux de recherche, nous nous sommes intéressés à la question de l'intégration de processus d'éco-conception dans une entreprise du secteur microélectronique et de l'opportunité de développer des outils adéquats pour diminuer l'empreinte environnementale de composants semi-conducteurs. Afin de répondre à cette question de recherche,

- Nous avons étudié dans un premier temps **les freins et stimuli liés à l'intégration de la dimension environnementale dans la conception de produits microélectroniques** afin de comprendre quels sont les enjeux pour une entreprise industrielle. Cette première phase consistait à **réaliser un statut sur le niveau de maturité du secteur**, à partir des travaux déjà réalisés : il s'agissait de comprendre les raisons de leur interruption ou de ce qu'il manquait pour aller plus loin. Avant le démarrage officiel de la thèse, certaines actions autonomes ont été menées par des entités indépendantes (par exemple une équipe de conception ou le service des achats) sans réellement donner un sens à une politique globale. A ce stade, il s'agissait d'analyser la situation actuelle et de structurer les objectifs des travaux de recherche par des enjeux précis et des objectifs qualitatifs et quantitatifs.
- Dans un second temps, il s'agissait de **simplifier et consolider la méthode d'analyse de cycle de vie pour un produit microélectronique**. En effet, du fait de la complexité du produit tant au niveau de sa structure que de ses procédés de fabrication, l'évaluation environnementale par une méthodologie d'ACV représente une phase exigeante susceptible d'engendrer des incertitudes considérables sur les impacts globaux d'un produit. Une méthode de caractérisation environnementale du produit et de ses sous-systèmes a été imaginée.
- Ensuite nous avons **caractérisé le produit microélectronique dans son processus de développement selon des critères environnementaux** : le lien entre les décisions de conception et les impacts environnementaux qui leur sont attribués a été décrit ainsi que le rôle de chaque concepteur sur l'impact global du produit. Ce lien est réalisé grâce à la description structurée et segmentée du produit par des paramètres-clé. Cette phase peut être assimilée à une modélisation complète d'une situation de référence (le produit et sa structure, relations entre les acteurs, boîtes à outils et pratiques des concepteurs).
- Une fois ce lien établi, les concepteurs sont outillés afin de leur permettre de réduire l'impact environnemental du produit qu'ils conçoivent ou au moins de considérer la dimension environnementale pendant la conception. Une plateforme, dont le fonctionnement est illustré sur des études de cas, a été développée pour les différents métiers de conception en microélectronique. Chacun, par le biais de cette plateforme, a la possibilité de prédire le futur impact environnemental du produit en cours de développement et de simuler des configurations de conception.

- [Réponse à la question de recherche](#)

Les travaux présentés au long de cette thèse répondent à la question initiale de recherche du fait de la proposition d'une plateforme d'éco-conception permettant l'évaluation et l'amélioration environnementale du produit microélectronique et de ses entités pendant la conception. L'intégration de cette plateforme dans le processus de conception a été possible grâce à l'utilisation des liens entre les métriques des concepteurs (paramètres-clé, outils) et les impacts environnementaux associés. La caractérisation environnementale d'un produit et la modélisation de son cycle de vie sont réalisées à des niveaux d'abstraction différents en fonction du stade de la conception, du niveau de connaissance sur le produit, du concepteur demandeur de l'étude et du niveau de détails souhaités avant l'amélioration environnementale.

Les concepteurs, dont les disciplines et organisations du travail sont très différentes, ont la possibilité de s'employer pour la diminution de l'impact environnemental de leurs activités respectives, aux différentes étapes de la conception, en suivant les lignes directrices simples, fonctions des résultats de l'évaluation environnementale du produit microélectronique.

La méthodologie a été développée au sein d'équipes de conception, ce qui confère à l'ensemble des propositions faites pendant cette thèse une dimension industrielle et assure une appropriation par les futures équipes utilisatrices. La proposition est alors en adéquation avec les pratiques de l'ingénieur en entreprise afin d'adopter des réponses pertinentes aux besoins, explicites ou non, des utilisateurs de la méthodologie. Les travaux ont été guidés par un principe d'intégration de l'éco-conception dans les processus de l'entreprise de façon stratégique et séquentielle.

- [Apport de la démarche](#)

La proposition s'articule autour de l'évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie d'un produit microélectronique fini ou en cours de conception, suivie par des propositions d'aide à l'interprétation des résultats et à leur intégration dans le processus décisionnel existant. La réponse à l'intégration prend différentes formes comme l'aide à la conception pour les ingénieurs (points faibles d'un système, simulation de conception, comparaison de scénarii) ou une stratégie industrielle pour les fonctions dirigeantes de l'entreprise.

L'intégration de la dimension environnementale, conduite notamment par les contraintes réglementaires, est traitée dans cette thèse non comme une contrainte mais au sens d'une opportunité de réduire l'empreinte environnementale de la conception et donc une opportunité d'améliorer le produit mis sur le marché. La méthodologie présente la qualité d'être mise en œuvre à partir de données simples et accessibles, certains efforts de conceptualisation ayant été toutefois nécessaires lors du développement de la plateforme. En ce qui concerne les résultats fournis par la plateforme, ceux-ci sont simplifiés afin d'être compréhensibles et manipulables par l'ingénieur microélectronique, non expert en sciences environnementales.

- [Limites de la réponse apportée pendant les travaux de recherche](#)

Le cadre méthodologique est, à ce jour, limité du fait :

- du nombre de métiers de la conception considérés. Les métiers de la conception détaillée de circuit électrique ne sont pas directement concernés par la plateforme car il n'existe pas de fonctionnalités adaptées aux spécificités de la conception VHDL.
- de la portée des modèles paramétriques. Les modèles paramétriques sont réservés à certaines familles de produits et ne permettent pas de couvrir parfaitement des produits

plus spécifiques. La réponse à cette difficulté méthodologique peut venir de travaux intensifs sur la caractérisation environnementale des options des produits afin de couvrir le maximum de cas d'analogies. De ce fait, la modélisation du cycle de vie par analogie pour un produit microélectronique prend tout son sens.

- de l'hypothèse de conception par analogie. Les modèles prédictifs permettent d'évaluer un nouveau produit qui été construit par analogie à partir de produits de générations antérieures : le cas de conception radicale dans le cadre de R&D avancée n'est pas couvert par la méthodologie. Avec le type d'approche choisi, il est difficile de prédire les impacts environnementaux de structures très innovantes dans le sens où les performances environnementales des procédés de fabrication ne peuvent être connues, ni même les nouveaux matériaux utilisés dans les procédés.

Finalement, les cas d'application présentés ne permettent pas de confronter les caractéristiques environnementales aux autres paramètres de conception afin d'intégrer l'environnement dans un processus décisionnel industriel. Les résultats issus de la plateforme ont souvent été utilisés à titre informatif. L'orientation de la conception, notamment en conception préliminaire, n'est pas assez forte du fait d'un contexte industriel très contraignant et ne permet donc pas de définir des solutions adaptées au regard de l'ensemble des contraintes de conception (environnement, coût, performances électriques, etc.).

- [Pistes d'amélioration et perspectives](#)

Durant la thèse, quelques pistes ont été données pour le déploiement d'un système de management de l'éco-conception dans une entreprise fabricante de composants microélectroniques, basées sur l'exploitation des résultats de la plateforme. La phase de validation des propositions de thèse se conclut par la mise en place du système de management de l'éco-conception, donnant une politique intégrée de produits à l'échelle de l'entreprise. Les outils sont intégrés dans la boîte à outil des concepteurs avec le support correspondant (développement informatique, incorporation dans les procédures, support lors des analyses environnementales). Les parties prenantes identifiées ont les moyens d'intégrer l'environnement en conception.

Hormis la plateforme, un système de management plus global permettrait une plus grande connaissance et un meilleur suivi des performances environnementales des produits. La pensée «cycle de vie» est cohérente avec le mot d'ordre d'une ouverture vers les parties prenantes. En effet, bien que la conception soit le moment privilégié pour diminuer les impacts des produits, c'est aussi le moment où les acteurs sont les plus contraints de par la rigueur due au haut niveau technologique. D'autres acteurs interviennent alors pour guider les concepteurs hors des stades formels de la conception. La définition des rôles et des responsabilités de chaque acteur permettrait d'encadrer le développement d'une politique intégrée des produits et de suivre une feuille de route sur le déploiement stratégique des outils et méthodes dans une entreprise du secteur.

Nous avons développé des outils indépendants des systèmes d'informations existants du fait de la non-élasticité de ces systèmes. Toutefois, un couplage des systèmes d'informations du produit et de production permettrait de systématiser certaines opérations dans l'analyse environnementale du produit par une ACV. La démarche d'éco-conception pourrait être améliorée par l'emploi d'une telle structure de gestion de l'information rendant possible la comparaison « instantanée » de configurations pour le produit ou ses sous-systèmes.

Références bibliographiques

- [Abrassart'02] C. Abrassart and F. Aggeri. *Eco-conception : du cycle de vie du produit au management environnemental, Problèmes économiques*. La documentation Française (2776), 1-7, 2002.
- [Abrassart'07] C. Abrassart and F. Aggeri. Quelles capacités dynamiques pour les stratégies de développement durable des entreprises ? Le cas du management de l'éco-conception. In XVIe conférence internationale de management stratégique, 29, UQAM, Montréal, 2007.
- [Albritton'95] D.L. Albritton, R.G. Derwent, I.S.A. Isaksen, M. Lal and D.J. Wuebbles. Trace Gas Radiative Forcing Indices. In *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp. 205–231, 1995.
- [Alcamo'00] J. Alcamo, T. Henrichs and T. Röscher. World water in 2025: global modeling and scenario analysis, *World Water Scenarios Analyses*, Earthscan Publications, Editions F.R. Rijsberman, London, 396, 2000.
- [Argyris'00] C. Argyris. *Savoir pour agir, Surmonter les obstacles à l'apprentissage organisationnel*. Ed. Dunod, 2000.
- [Albertini'11] E. Albertini. L'engagement environnemental des entreprises : une revue de littérature. In 32ème Congrès de l'AFC, Montpellier, France, 2011.
- [Andrae'06] A.S.G. Andrae. Environmental Life Cycle Assessment in Microelectronics Packaging. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (3): 215-216, 2006.
- [Andrae'11] A. S.G. Andrae and O. Andersen. Life cycle assessment of integrated circuit packaging technologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16 (3): 258-267, 2011.
- [Antheaume'01] N. Antheaume. La diffusion volontaire d'informations environnementales : le cas de Cogema. 22ème congrès de l'AFC. 2001.
- [Azapagic'99] A.L. Azapagic. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73 (1): 1-21, 1999.
- [Baret'09] P. Baret and F. Petit. L'apprentissage organisationnel de la responsabilité environnementale : un 'cheminement' structuré? *Management & Avenir*, 33: 96-115, 2009.
- [Bassetti'02] A.-L. Bassetti. *Gestion du changement, gestion de projet : convergence divergence. Cas des risques en conception et mise en place d'une organisation de management de l'environnement*. Thèse de doctorat, ENSAM, Paris, 2002.
- [Bastian'06] O. Bastian and M. Lutz. Landscape functions as indicators for the development of local agri-environmental measures. *Ecological Indicators*, 6 (1): 215-227, 2006.
- [Baudry'12] I. Baudry, A. Lelah and D. Brissaud. Data Collection of Chemicals used in Microelectronic Manufacturing Processes for Environmental Studies. In 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, 2012.
- [Baumann'02] H. Baumann, F. Boons and A. Bragd. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 10: 409-425, 2002.
- [Behrisch'10] J. Behrisch, M. Ramirez and D. Giurco. The use of eco-design strategies and tools: state of the art in industrial design praxis. Comparing Australian and German consultancies. Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation ERSCP-EMSU conference, Delft, The Netherlands, October 2010.

- [Bellekom'06] S. Bellekom, J. Potting and R. Benders. Feasibility of Applying Site-dependent Impact Assessment of Acidification in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (6): 417-424, 2006.
- [Bellini'11] B. Bellini and M. Janin. Écoconception : état de l'art des outils disponibles. *Techniques de l'Ingénieur, Ingénierie et management de l'innovation*, 2011.
- [Ben Mena'00] S. Ben Mena. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision, *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 4 (2): 83-93, 2000.
- [Bhander'03] G.S. Bhander, M. Hauschild and T. McAlloone. Implementing life cycle assessment in product development, *Environmental Progress*, 22 (4): 255-267, 2003.
- [Bischof'08] A. Bischof and L. Blessing. Guidelines for the development of flexible products. Proceedings of the 10th International Design Conference - DESIGN 2008, Dubrovnik, 289-300, 2008.
- [Blanc'10] I. Blanc. *Evaluation des impacts environnementaux de filières énergie : vers une approche intégrée*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Savoie, 2010.
- [Blowers'04] P. Blowers and M. Titus. Use of life-cycle inventory as a screening tool for environmental performance: Supercritical carbon dioxide in the semiconductor industry. *Environmental Progress*, 23: 284-290, 2004.
- [Boks'06] C. Boks. The soft side of ecodesign, *Journal of Cleaner Production* 14: 1346-1356, 2006.
- [Bonvoisin'10] J. Bonvoisin, F. Mathieux, L. Domingo and D. Brissaud. Design for energy efficiency : proposition of a guidelines-based tool. In International DESIGN Conference, 2010.
- [Bowman'94] F.M. Bowman and J.H. Seinfeld. Ozone productivity of atmospheric organics. *Journal of Geophysical Research*, 99 (3): 5309-5324, 1994.
- [Boyd'10] S. Boyd, A. Horvath and D.A. Dornfeld. Life-cycle assessment of computational logic produced from 1995 through 2010. *Environmental Research Letters*, 5 (1), 2010.
- [Brezet'97-a] J.-C. Brezet. Dynamics in ecodesign practice, *UNEP Industry and Environment*, 20 (1-2): 21-24, 1997.
- [Brezet'97-b] H. Brezeet and C. van Hemel. *EcoDesign: A promising approach to sustainable production and consumption*, UNEP, France, 1997.
- [Brissaud'98] D. Brissaud and O. Garro. Conception distribuée, émergence, *Conception de produit mécanique, Méthodes, Modèles, Outils*, Edition Hermès, 1998.
- [Chan'04] E.M. Chan, G. Loh and C.C. Allgood. Process Optimization and PFC Emission Reduction using a c-C4F8 Chamber Cleaning Process on a Novellus Concept 1 Dielectric PECVD Tool, *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, 17 (4), 2004.
- [Chang'01] I.S. Chang and J.H. Kim. Development of clean technology in wafer drying processes. *Journal of Cleaner Production* 9 (3): 227-232, 2001.
- [Chatterjee'09] S. Chatterjee and K. Kumar. Effective electronic waste management and recycling process involving formal and non-formal sectors. *International Journal of Physical Sciences*, 4 (13): 893-905, 2009.
- [Cohen'03] R.M. Cohen. Energy Efficiency for Semiconductor Manufacturing Facilities, *ASHRAE Journal*, 45 (8): 28-34, 2003.
- [Cui'08] J. Cui and L. Zhang. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158 (2-3): 228-256, 2008.
- [Cullen'01] M.R. Cullen, H. Checkoway, E.A. Eisen, K. Kelsey, C. Rice and D.H. Wegman. Cancer risk among wafer fabrication workers in the semiconductor industry

- evaluation of existing data and recommended future research, 2001.
http://www.sia-online.org/clientuploads/SAC_Summary.pdf
- [Dahlström'99] H. Dahlström. Company-specific guidelines. *The Journal of Sustainable Product Design*, 8: 18-24, 1999.
- [de Caluwe'04] N. de Caluwe. Business benefits from applied EcoDesign. *Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on*, 27 (4): 215-220, 2004.
- [De Grave'06] A. De Grave, H.N. Hansen and S.I. Olsen. Sustainability of products based on micro and nano technologies. In Proceedings of the 4th International Symposium on Nanomanufacturing, 40-45, MIT, Cambridge, USA, 2006.
- [De Grave'07] A. De Grave and D. Brissaud. Integrated design of micro-electromechanical systems, *Journal of Design Research*, 5 (4), 2007.
- [Dewulf'03] W. Dewulf. A pro-active approach to ecodesign : framework and tools. PhD Thesis, University of Leuven, 2003.
- [Dewulf'05] D. Dewulf and R. Duflou. Integrating Eco-Design into business environments, a multi-level approach. *Product Engineering, Eco-Design, Technologies and green energy*, 1: 55-76, 2005.
- [Dickinson'02] D.A. Dickinson, J.A. Mosovsky, R.J. Caudill, D.J. Watts and J.M. Morabit. Application of the sustainability target method: supply line case studies. In IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 139-143, San Francisco, 2002.
- [Diemer'12] A. Diemer. La technologie au cœur du développement durable : mythe ou réalité? *Innovations*, 37 (1): 73, 2012.
- [Dincer'99] I. Dincer. Environmental impacts of energy, *Energy Policy* 27 (14): 845–854, 1999.
- [Dreyer'03] L.C. Dreyer and A.L. Niemann. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and ECO-indicator99. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8: 191-200, 2003.
- [Duque Ciceri'10] N. Duque Ciceri, T.G. Gutowski and M. Garetti. A Tool to Estimate Materials and Manufacturing Energy for a Product. In IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 1-6, 2010.
- [Ernst'11] E. Ernst. *La production de déchets non dangereux dans l'industrie manufacturière en 2008*. <http://www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1335/ip1335.pdf>, 2011.
- [Ekvall'05] T. Ekvall and A. Andrae. Attributional and Consequential Environmental Assessment of the Shift to Lead-Free Solders. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11: 344-353, 2005.
- [Fargnoli'08] M. Fargnoli and T. Sakao. Coordinating Ecodesign Methods in Early Stages of Industrial Product Design. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*. 14(2): 35-65, 2008.
- [Fiksel'96] J. Fiksel. *Design for Environment*, McGraw-Hill, 1996.
- [Finnveden'05] G. Finnveden and A. Moberg. Environmental system analysis tools – an overview, *Journal of Cleaner Production*, 13: 1165-1173, 2005.
- [Fryxeel'99] G.E. Fryxeel and M. Vryza. Managing environmental issues across multiple functions: an empirical study of corporate environmental departments and functional coordination, *Journal of Environment Management*, 55: 39-56, 1999.
- [Goedkoop'00] M. Goedkoop and R. Spriensma. *The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report*, 2nd edition, PRé Consultants, 2000.
- [Granollers'03] T. Granollers. User Centred Design Process Model. Integration of Usability Engineering and Software Engineering, Proceedings of INTERACT, 2003.

- [Gray'95] R. Gray, R. Kouhy and S. Lavers. Corporate social and environmental reporting, A review of the literature and a longitudinal study of the UK disclosure. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 8(2): 47-77, 1995.
- [Griese'04] H. Griese, K. Schischke, H. Reichl and L. Stobbe. Sustainable Development of Microelectronic Technology Processes, Integration of EcoDesign. In Proceeding of the sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, 154-159, 2004.
- [Grisel'04] L. Grisel and P. Osset. *L'analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un service – application et mise en pratique*, AFNOR, 2004, ISBN : 2-12-475091-7 ?
- [Guinée'93] J.B. Guinée, R. Heijungs, H.A. Udo de Haes and G. Huppes. Quantitative life cycle assessment of products. 2: Classification, valuation and improvement analysis. *Journal of Cleaner Production*, 1(2) : 81-91, 1993.
- [Gungor'99] A. Gungor and S.M. Gupta. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering*, 36(4): 811-853, 1999.
- [Hagelüken'06-a] C. Hagelüken. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling. In Proceedings of the 2006 IEEE Int. Symposium on Electronics and the Environment, 218-223, 2006.
- [Hagelüken'06-b] C. Hagelüken. Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery. *Erzmetall*, 59: 152-161. 2006.
- [Harland'07] J. Harland, D. Harman and L. Drago. Design for Environment in New Semiconductor Manufacturing Technologies. In International Symposium on Electronics and the Environment, Los Alamitos, CA, USA, 91-96, 2007.
- [Hauschild'05] M. Hauschild and J. Potting. Spatial differentiation in life cycle assessment. The EDIP 2003 methodology. Environmental News 80 2005, Danish Ministry of the Environment, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [Hettelingh'05] J-P. Hettelingh, M. Posch and J. Potting. Country-dependent Characterisation Factors for Acidification in Europe – A Critical Evaluation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (3): 177-183, 2005.
- [Higgs'09] T. Higgs, M. Cullen, M. Yao and S. Stewart. Developing an overall CO2 footprint for semiconductor products. In IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 1-6, 2009.
- [Horne'09] R. Horne and K.L. Verghese. Accelerating life cycle assessment uptake: life cycle management and 'quick'LCA tools. *Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects*, R. Horne, T. Grant, K. Verghese, CSIRO Publishing, 141-160, 2009.
- [Humbert'05] S. Humbert, M. Margni and O. Jolliet. *IMPACT 2002+: User Guide*, Industrial Ecology & Life Cycle Systems Group, GECOS, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, 2005.
- [IEC'05] IEC, Guide 114. Environmentally conscious design – Integrating environmental aspects into design and development of electro technical products, <http://www.iec.ch/>. 2005.
- [Janhager'05] J. Janhager. *User Consideration in Early Stages of Product Development – Theories and Methods*. Doctoral thesis, KTH University, 2005, ISSN 1400-1179.
- [Janicot'07] L. Janicot. Les systèmes d'indicateurs de performance environnementale (IPE), entre communication et contrôle. *Comptabilité-Contrôle-Audit*, 13 (1): 47-68, 2007.
- [Janin'00] M. Janin. *Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus*. Doctorat de Génie Industriel, 2000.
- [Jeswiet'05] J. Jeswiet and M. Hauschild. Eco-design and future environmental impacts. *Journal Materials and Design*, 26 (7): 629-634, 2005.

- [Johansson'01] G. Johansson. *Environmental performance requirements in product development. An exploratory study of two development projects*. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Linköping University, 2001.
- [Jolliet'05] O. Jolliet, M. Saadé and P. Crettaz. *Analyse du cycle de vie – Comprendre et réaliser un éco-bilan*, Presses Polytechniques et Universitaires romandes, EPFL, 2005.
- [Judge'98] W.Q. Judge and T.J. Douglas. Performance implications of incorporating natural environmental issues into the strategic planning process : an empirical assesment. *Journal of Management Studies*. 35 (2): 241-262, 1998.
- [Kaebernick'00] H. Kaebernick and V. Soriano. An approach to simplified environmental assessment by classification of products, 7th CIRP International Seminar on LCE, Tokyo, Japan, 2000.
- [Kahhat'11] R. Kahhat, S. Poduri and E. Williams. Bill of Attributes (BOA) in Life Cycle Modeling of Laptop Computers: Results and Trends from Disassembly Studies. *The Sustainability Consortium, White Paper #103*, March 2011.
- [Krewitt'01] W. Krewitt, A. Trukenmüller, T.M. Bachmann and T. Heck. Country-specific damage factors for air pollutants. A step towards site dependent life cycle impact assesment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (4): 199-210, 2001.
- [Krishnan'04] N. Krishnan, S. Raoux and D. Dornfeld. Quantifying the Environmental Footprint of Semiconductor Equipment Using the Environmental Value Systems Analysis (EnV-S), *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 17 (4): 554-561, 2004.
- [Krishnan'08] N. Krishnan, S. Boyd, A. Somani and D. Dornfeld. A Hybrid Life Cycle Inventory of Nano-Scale Semiconductor Manufacturing. *Environmental Science and Technology*, 42 (8): 3069-3075, 2008.
- [Lehner'03] T. Lehner. E&HS aspects on metal recovery from electronic scrap . In Electronics and the Environment, International Symposium on, Los Alamitos, CA, USA, 2003.
- [Lenox'96] M. Lenox, B. Jordan and J.R. Ehrenfeld. The diffusion of DfE: a survey of current practice. In Proceedings from the IEEE symposium on electronics and the environment, 1996.
- [Le Pochat'03] S. Le Pochat, and G. Bertoluci. Consequences for businesses of taking into account environmental constraints. 6th QMOD International Conference, Paris, October 2003.
- [Le Pochat'05] S. Le Pochat. *Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits*. Thèse de Doctorat de l'ENSAM Paris, 2005.
- [Lindahl'03] M. Lindahl. Designer's utilization of DfE methods. In 1st International Workshop on Sustainable Consumption, Tokyo, March 2003.
- [Lindahl'06] M. Lindahl. Engineering designers' experience of design for environment methods and tools – Requirement definitions from an interview study, *Journal of Cleaner Production* 14 (5): 487-496, 2006.
- [Liu'10] CH. Liu, S.J. Lin and C. Lewis. Life cycle assessment of DRAM in Taiwan's semiconductor industry, *Journal of Cleaner Production* 18 (5): 419–425, 2010.
- [Lofthouse'06] V.A. Lofthouse. Eco-design tools for designers - defining the requirements. *Journal of Cleaner Production*, 14 (15-16): 1386-1395, 2006.
- [Luttropp'06] C. Luttropp and J. Lagerstedt. EcoDesign and the ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development, *Journal of Cleaner Production*, 14 (15-16): 1396-1408, 2006.

- [Lütz'08] M. Lütz and F. Felici. Indicators to identify the agricultural pressures on environmental functions and their use in the development of agri-environmental measures. *Reg Environ Change*, 9 (3): 181-196, 2008.
- [Masuzawa'00] T. Masuzawa. State of the art of micromachining, *Annals of the CIRP*, 49(2): 473-488, 2000.
- [McAloone'00] T. McAloone. Where's eco-design going ?, *Electronics Goes Green*, 2000.
- [Millet'03] D. Millet (sous la direction), C. Coppens, L. Jacqueson, R. Le Borgne and P. Tonnelier. *Intégration de l'environnement en conception*, 2003.
- [Murphy'03-a] C.F. Murphy, G.A. Kenig, D.T. Allen, J.-P. Laurent and D.E. Dyer. Development of Parametric Material, Energy, and Emission Inventories for Wafer Fabrication in the Semiconductor Industry, *Environmental Science and Technology*, 37 (23): 5373-5382, 2003.
- [Murphy'03-b] C.F. Murphy, J.-P. Laurent and D.E. Dyer. Life cycle inventory development for wafer fabrication in semiconductor manufacturing . In *Electronics and the Environment*, IEEE International Symposium, 276-281, 2003.
- [Norgate'07] T.E. Norgate, S. Jahanshahi and W.J. Rankin. Assessing the environmental impact of metal production processes, *Journal of Cleaner Production*, 15 (8-9): 838-848, 2007.
- [Norris'02] G. Norris, Impact Characterization in the Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts: Methods for Acidification, Eutrophication, and Ozone Formation. *International Journal of Industrial Ecology*, 6 (3-4): 79-101, 2002.
- [Olson'92] G.M. Olson and J. S. Olson. Small Group Conception Meetings: An Analyse of Collaboration, *Human-Computer Interaction*, 7(4): 347-374, 1992.
- [Olsthoorn'01] X. Olsthoorn, D. Tyteca, W. Wehrmeyer and M. Wagner. Environmental indicators for business: a review of the literature and standardisation method. *Journal of Cleaner Production*, 9: 53-463, 2001.
- [Pahl'96] G. Pahl, W. Beitz. *Engineering Design – a systematic approach. 2nd edition* Springer-Verlag, Londres, 1996.
- [Pandey'10] R. Pandey and R.J. Holmes. Organic Photovoltaic Cells Based on Continuously Graded Donor–Acceptor Heterojunctions, *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 16 (6): 1537-1543, 2010.
- [Park'09] Y.J. Park and D.J. Fray. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards, *Journal of Hazardous Materials*, 164 (2-3): 1152-1158, 2009.
- [Pennington'06] D.W. Pennington, J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliet, T. Rydberg and G. Rebitzer, Life cycle assessment - Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30 (5): 721-739, 2004.
- [Pistoni'07] M.F. Pistoni and I. Bianchi. SF6 Replacement for Dry Etching Techniques in IC Development and Manufacturing Conforming to EHS Strategy. *Future Fab Intl*, 22, 2007.
- [Pizzol'11] M. Pizzol, P. Christensen, J. Schmidt and M. Thomsen. Eco-toxicological impact of “metals” on the aquatic and terrestrial ecosystem: A comparison between eight different methodologies for Life Cycle Impact Assessment (LCIA), *Journal of Cleaner Production*, 19 (6-7): 687-698, 2011.
- [Plepys'04] A. Plepys. The environmental impacts of electronics. Going beyond the walls of semiconductor fabs. In *Proceedings of the International Symposium on Electronics and the Environment*, 159-165, 2004.
- [Plouffe'11] S. Plouffe, P. Lanoie, C. Berneman and M-F. Vernier. Economic benefits tied to ecodesign, *Journal of Cleaner Production*, 19 (6-7): 573-579, 2011.
- [Potting'98] J. Potting , W. Schöpp, K. Blok and M. Hauschild. Site-dependent life-cycle impact assessment of acidification. *Journal of Industrial Ecology*, 2 (2): 63-87, 1998.

- [Potting'06] J. Potting and M. Hauschild. Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment: A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (0): 11-13, 2006.
- [Rabaey'03] J. Rabaey, A. Chandrakasan and B. Nikolic. *Digital Integrated Circuits, A Design Perspective*, Second Edition, Prentice Hall, 2003.
- [Reap'08-a] J. Reap, F. Roman, S. Duncan and B. Bras. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: goal and scope and inventory analysis, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (5): 374-388, 2008.
- [Reap'08-b] J. Reap, F. Roman, S. Duncan and B. Bras. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 2: impact assessment and interpretation, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (4): 290-300, 2008.
- [Reijnders'98] L. Reijnders. The factor X debate: setting targets for eco-efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, 2 (1): 13-22, 1998.
- [Reyes'07] T. Reyes. *L'éco-conception dans les PME : les mécanismes du Cheval de Troie Méthodologique et du choix de trajectoire comme vecteur d'intégration d'environnement en conception*, Thèse de doctorat, Université du Sud Var-Toulon, 2004.
- [Reyes'09] T. Reyes and S. Rohmer. The Trojan horse method as a vector of ecodesign integration: a case study at a French SME. In International Conference of engineering Design, 24-27, ICED'09, Stanford, 2009.
- [Ribeiro'08] I. Ribeiro, P. Peças, A. Silva and E. Henriques. Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study. *Journal of Cleaner Production* 16(17): 1887-1899, 2008.
- [Rio'11] M. Rio, T. Reyes and L. Roucoules. Framework for ecodesign: an interface between LCA and design process, *International Journal of Engineering*, 9(1), 2011.
- [Rizzoa'10] G. Rizzoa, A. Arenab, N. Donatob, M. Latinob, G. Saittab, A. Bonavitaa and G. Neri. Flexible, all-organic ammonia sensor based on dodecylbenzene sulfonic acid-doped polyaniline films, Thin solid film, 518(23): 133-7137, 2010.
- [Rosenbaum'08] R.K. Rosenbaum, T.K. Bachmann, L.S. Gold, M.A.J. Huijbregts, et al. USEtox - The UNEP/SETAC-consensus model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity, *The International Journal of Life Cycle Impact Assessment*, 13 (7):532-546, 2008.
- [Rousseau'05] F. Rousseau. Conception des systèmes VLSI, *Techniques de l'Ingénieur*, Référence E2455, 2005.
- [Rubin'94] S. Rubin. *Computer Aids for VLSI Design*, Second Edition, S. Rubin, 1994.
- [Rupp'11] K. Rupp and S. Selberherr. The Economic Limit to Moore's Law Semiconductor Manufacturing, *IEEE Transactions on* 24 (1): 1-4, 2011.
- [Salomons'95] W. Salomons. Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration* 52 (1-2): 5-23, 1995.
- [Sarkis'03] J. Sarkis. A strategic decision framework for green supply chain management, *Journal of Cleaner Production*, 11: 397-409, 2003.
- [Schischke'01] K. Schischke, M. Stutz, J.-P. Ruelle, H. Griesse and H. Reichl. Life Cycle Inventory Analysis and Identification of Environmentally significant aspects in Semiconductor Manufacturing. In IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 145-150, May 2001.
- [Schischke'02] K. Schischke, H. Griesse, J. Muller, H. Reichl and I. Stobbe. Lean Environmental Management for Green Processes in Electronics Manufacturing – The Screening Assessment Tool ProTox. In Proc Electronic Circuits World Convention, Cologne, 2002.

- [Schischke'04] K. Schischke, H. Griesse. Is small green? Life Cycle Aspects of Technology Trends in Microelectronics and Microsystems. LCA Center, 2004.
http://www.lcacenter.org/InLCA2004/papers/Schischke_K_paper.pdf.
- [Schmidt'11] M. Schmidt, H. Hottenroth, M. Schottler, G. Fetzer and B. Schlüter. Life Cycle Assessment of Silicon Wafer Processing for Microelectronic Chips and Solar Cells, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17 (2): 126-144, 2011.
- [Seppälä'00] J. Seppälä and M. Huijbregts. Towards Region-Specific, European Fate Factors for Airborne Nitrogen Compounds Causing Aquatic Eutrophication. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 (2): 65-67, 2000.
- [Smati'01] R. Smati, S. Raoux, D. Ho and M. Woolston. *Measuring and modeling gas consumption and emissions from semiconductor manufacturing processes*. EHS Assessment Techniques, SEMICON West, 2001.
- [Smith'01] A.R. Smith and J. Klosek. A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes, *Fuel Processing Technology*, 70 (2): 115-134, 2001.
- [Somani'06] A. Somani, P. Gschwend, S.J. White, D. Boning and R. Reif. Environmental Impact Evaluation Methodology for Emerging Silicon-Based Technologies. In IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 258-263, 2006.
- [Stevens'99] A. Stevens, Integration of eco-design into Business, A new Challenge. Proceedings of Eco-Design 99, 27-32, 1999.
- [Szendiuch'07] I. Szendiuch and K. Schischke. Eco-design as the tool for decreasing the impact of electronic technology on environment. In International Symposium on micro-electronics, 2007.
- [Taiariol'01] F. Taiariol, P. Fea, C. Papuzza, R. Casalino, E. Galbiati and S. Zappa. Life cycle assessment of an integrated circuit product. In IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 128-133, May 2001.
- [Tang'06] Y. K. Tang, S. Stoyanov, C. Bailey and H. Lu, 2006. Decision Support Systems for Eco-friendly Electronic Products. In International Conference on Electronic Materials and Packaging, 1-8, 2006.
- [Tiger'98] H. Tiger and D. Millet. Conception pour l'environnement : inventer de nouveaux outils et de nouveaux systèmes d'action, *Conception de produits mécaniques – Méthodes, modèles et outils*, 1998.
- [Tsai'02] W.T. Tsai, H.P. Chen and W.Y. Hsien. A review of uses, environmental hazards and recovery/recycle technologies of perfluorocarbons (PFCs) emissions from the semiconductor manufacturing processes, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15 (2): 65-75, 2002.
- [Tschudi '00] W. Tschudi. Energy Benchmarking in Cleanroom Facilities, LBNL, October 2000.
- [Tukker'00] A. Tukker, E. Haag and P. Eder. Eco-design: European state of the art. Report EUR 19583 EN, ESTO, IPTS, Seville, Spain, 2000.
- [Verghese'10] K.L. Verghese, R. Horne and A. Carre. PIQET: the design and development of an online 'streamlined' LCA tool for sustainable packaging design decision support. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15 (6): 608-620, 2010.
- [Vezzoli'06] C. Vezzoli and D. Sciamia. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. *Journal of Cleaner Production*, 14 (15-16): 1319-1325, 2006.
- [Vicca'10] P. Vicca, S. Steudel, S. Smout, A. Raats, J. Genoe and P. Heremans. A low-temperature-cross-linked poly (4-vinylphenol) gate-dielectric for organic thin film transistors, *Thin Solid Films*, 519: 391-393, 2010.
- [Vinodh'10] S. Vinodh and G. Rathod. Integration of ECQFD and ACV for sustainable product design, *Journal of Cleaner Production*, 18 (8): 83-84, 2010.

- [WCED'87] World Commission on Environment and Development. *Brundtland Report, Our common future*. United Nations, WCED, Oxford University Press. 1987
- [Weidenhaupt'97] A. Weidenhaupt and K. Hungerbühler. Integrated Product Design in Chemical Industry. A Plea for Adequate Life-Cycle Screening Indicators, CHIMIA. *International Journal for Chemistry*, 51 (5): 217-217, 1997.
- [Williams'02] E.D. Williams, R.U. Ayres and M. Heller. The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices. *Environmental Science and Technology*, 36 (24): 5504-5510, 2002.
- [Williams'04] E.D. Williams. Environmental impacts of microchip manufacture. *Thin Solid Films* 461: 2-6, 2004.
- [Wimmer'01] W. Wimmer and R. Züst. *ECODESIGN Pilot*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [Wimmer'03] W. Wimmer and R. Züst. *ECODESIGN PILOT, Product-Investigation, Learning- and Optimization - Tool for Sustainable Product Development*. Kluwer Academics Publisher B.V., 2003.
- [Yongming'09] W. Yongming, L. Baixiang and L. Muzhi. Application of Quality Function Deployment for Environment in Product eco-design. In Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, Korea, 2009.

Textes réglementaires et normatifs

Directive 2009/125	Directive 2009/125/CE du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie
Directive DEEE	Directive 2002/96/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), L 37/24, 13.2.2003.
Directive ErP	Directive 2009/125/CE (ErP) du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie, L 285/10, 31.10.2009.
Directive EuP	Directive 2005/32/EC – établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie
Directive RoHS	Directive 2002/95/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, L 37/19, 13.2.2003.
Directive VHU	Directive 2000/53/CE du Parlement Européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage, L 269/34, 21.10.2000.
ETSI ES 203 215	Environmental Engineering (EE); Measurement Methods and Limits for Power Consumption in Broadband Telecommunication Networks Equipment; V1.1.1, 2010.
ISO 14001	Systèmes de management environnemental - Exigences et lignes directrices pour son utilisation. 2004.
ISO 14031	Management environnemental - Évaluation de la performance environnementale - Lignes directrices. 1999
ISO 14040	Management environnemental - Analyse du cycle de vie- Principes et cadre. 2006.
ISO 14044	Management environnemental - Analyse du cycle de vie- Exigences et lignes directrices. 2006.
ISO/TR 14062	Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. 2009.
ISO14644-1	Salles propres et environnements maîtrisés apparentés -Partie 1: Classification de la propreté de l'air. 1999.
ISO7816-3	Cartes d'identification - Cartes à circuit intégré : nature des signaux électriques et protocole de transmission entre le terminal et la carte. 2011
Livre Vert	Commission des Communautés Européennes (2001). Livre vert sur la Politique Intégrée de Produits, COM(2001) 68 final, Bruxelles, 07.02.2001.
Règlement REACH	Règlement n°1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du parlement européen et du conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques.

Annexes

ANNEXE 1-A. Processus de fabrication d'un transistor

Dans cette section, nous décrirons le processus de création d'un transistor CMOS, le type le plus simple de transistor. Cela nous permettra d'introduire brièvement les principaux types de processus utilisés en microélectroniques : CMP, PVD, CVD, gravure sèche, gravure humide, photolithographie, diffusion, implantation ionique.

Fabrication de la plaquette en silicium – le wafer

Le processus de formation des plaquettes de silicium est similaire à celui de croissance de cristaux. Un germe cristallin de silicium est immergé dans un bain de silicium fondu. Il est sorti doucement, et comme la croissance des cristaux se produit de façon uniforme dans toutes les directions, la section transversale est circulaire et, comme il est allongé, il forme un lingot cylindrique. Cette opération, qui dure près de 24 heures, produit un cylindre de diamètre plus grand que l'on souhaite. Le lingot est poli jusqu'au diamètre requis, puis est découpé en tranches. Initialement, le substrat de silicium a une épaisseur d'environ 650 microns. A ce stade, les plaquettes ont une texture rugueuse et ont besoin d'être finement polies pour être parfaitement planes.

Tout défaut cristallin ou contamination pourrait être problématique pour les prochaines opérations : il est donc impératif que le silicium soit ultra-pur. Afin d'obtenir la meilleure qualité possible du silicium, on fait croître une couche de silicium pur sur la plaquette grâce à un processus de croissance épitaxiale. Cette couche, appelée épi-couche, est très mince - d'environ 3% de l'épaisseur de la plaquette. Cette pratique s'est développée depuis quelques années, avec la complexification des composants semi-conducteurs.

Dès l'arrivée de la plaquette dans les usines front-end, la plaquette est nettoyée chimiquement pour supprimer les matières particulaires ainsi que des traces d'impuretés organiques, ioniques, et métalliques sur la surface. Après ce nettoyage, du dioxyde de silicium, servant de barrière, est déposé sur la surface de la plaquette.

La fabrication d'un transistor se sépare en deux parties distinctes :

- le FEOL (front-end of the line) : phase de formation des zones actives des transistors ;
- le BEOL (back-end of the line) : phase de métallisation pour l'interconnexion des transistors.

FEOL: formation des zones actives des transistors

La photolithographie est une opération, répétée de nombreuses fois au cours du processus de fabrication d'un circuit intégré. C'est un processus de transfert de formes géométriques gravées sur un masque à la surface de la plaquette de silicium.

Une résine photosensible est déposée en fine couche uniforme à la surface de la plaquette par un procédé de spin-coating: après le dépôt d'une goutte de résine, la plaquette est mise en rotation sur un plateau et la résine s'étale sous l'effet des forces centrifuges. La résine est alors exposée à un rayonnement ultra-violet là où le matériau sous-jacent doit être enlevé (Figure 61). L'exposition à la lumière UV modifie la structure chimique de la résine de sorte qu'elle devient soluble.

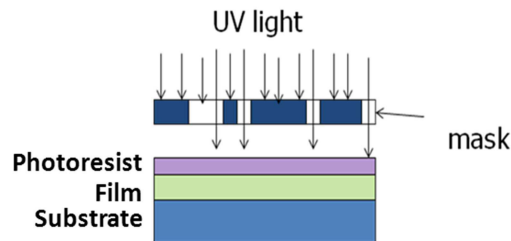


Figure 61 : Principe de la photolithographie

La partie exposée de la résine est ensuite enlevée avec un solvant, le développeur, laissant des fenêtres libres dans le matériau (Figure 62-a). Le masque, par conséquent, contient une copie exacte du motif contenu dans les masques photolithographiques. Le temps d'exposition dépend de nombreuses variables, parmi la sensibilité de la résine, l'ouverture de l'objectif, etc.

Les étapes impliquées dans le processus de photolithographie sont : nettoyage de la plaquette, spin-coating, cuisson lente, alignement des masques, exposition et développement, puis passage au four assez long.

La plaquette est ensuite gravée pour retirer la couche d'oxyde non protégée par la résine (Figure 62-b). Une étape de gravure sèche est utilisée pour graver le motif qui a été défini au cours du processus de photo-masquage. La plaquette est placée dans une chambre où est fait le vide : un mélange de gaz y est excité par un générateur de fréquence radio pour former un plasma. Le gaz réactif ionisé, transporté vers la surface de la plaquette, réagit physiquement avec la surface, formant des composés volatils. L'espèce chimique est sélectionnée en fonction de la nature de la couche à graver : ce procédé de gravure est dit sélectif.

Ensuite, la résine doit être retirée (Figure 62-c). On utilise des bains d'acide fluorhydrique ou d'acide phosphorique. Ce processus est appelé « strip » ou « gravure humide ». Le retrait de résine doit être complet puisque c'est un matériau organique et s'il était laissé sur la plaquette, pourrait causer des défauts.



Figure 62 : Formation de motifs dans une couche par photolithographie/gravure

Les zones actives, les bornes, du transistor peuvent être formées. Pour les transistors bipolaires, ce sont la base, l'émetteur et le collecteur. Pour les transistors à effet de champ : la grille, la source, le drain. Ces régions sont créées sur la base du silicium.

La grille est une couche conductrice ? séparée du silicium par un oxyde de grille mince. Une charge électrique positive sur la grille va créer un champ opposé négatif vers la surface du silicium. Ce champ négatif crée essentiellement un canal conducteur entre la source et le drain, laissant circuler un courant entre eux.

L'approche la plus classique pour créer des « caissons » de silicium avec des propriétés électriques différentes est de déposer un produit dopant, tel que le bore, sur la surface. Les ions de ces substances donnent des propriétés différentes au silicium, matériau semi-conducteur. Le dopage du silicium est réalisé selon un processus appelé implantation ionique (Figure 63). Les atomes dopants sont introduits à l'intérieur du silicium par un faisceau d'ions de haute énergie. Ce procédé permet de faire pénétrer des atomes à une profondeur donnée de silicium : les atomes pénètrent

verticalement dans le silicium sans effet de diffusion latéraux. Les atomes volontairement injectés dans le réseau de silicium, modifient les caractéristiques du matériau dans des zones prédéfinies: ils sont divisés en caissons « N » et « P » catégories représentant les porteurs positifs et négatifs. Différents dopants sont utilisés pour atteindre ces caractéristiques souhaitées: phosphore, arsenic (type N) et bore (type P) sont les plus fréquemment utilisés.

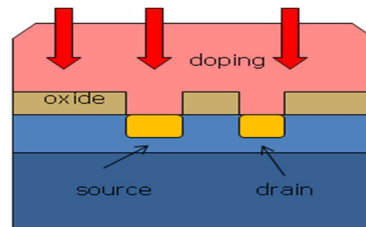


Figure 63 : Implantation ionique pour formation des zones source et drain

Ensuite, la grille est créée : elle est formée d'un oxyde de grille et d'une couche de silicium polycristallin (Figure 64).

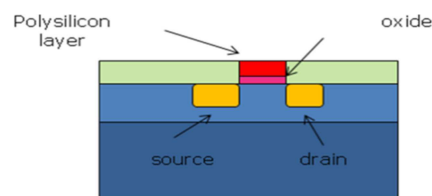


Figure 64 : Bornes du transistor

L'oxyde de grille est une couche mince car le champ électrique doit traverser cet isolant. Le dépôt d'un film de nitrure de silicium est réalisé avec un processus de dépôt chimique en phase vapeur (CVD), selon deux techniques différentes : le LPCVD (low pressure), dépôt fait à basse pression dans des fours ou le PECVD (Plasma Enhanced), dépôt fait en présence de plasma.

Le silicium poly-cristallin est déposé par un procédé de dépôt physique en phase vapeur (PVD), aussi connu sous le nom de « pulvérisation ». Le PVD consiste à créer un plasma avec des ions argon. Ces ions heurtent la surface d'une cible composée du métal dont on veut créer déposer une couche et arrachent des atomes métalliques de la cible. Ensuite, les atomes sont projetés dans toutes les directions et la plupart se condense sur la surface du substrat (Figure 65).

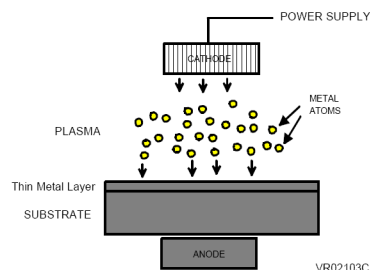


Figure 65 : Principe du PVD

BEOL : métallisation pour l'interconnexion des transistors

Divers types d'oxydes sont utilisés pour isoler électriquement des lignes ou des transistors les uns des autres. Les oxydes peuvent être formés par oxydation de silicium, par diffusion, ou peuvent être déposées par CVD.

Le principe de diffusion, ici en Figure 66 est exploité pour faire croître une couche d'oxyde de silicium à la surface du silicium monocristallin ou polysilicium. C'est le principe que sous l'effet de l'agitation thermique, on observe un déplacement des constituants des zones de forte concentration vers celles de plus faible concentration. Elle est obtenue à haute température (typiquement entre 900°C et 1250°C) sous flux de vapeur d'eau. L'oxydation est dite humide (wet oxidation).

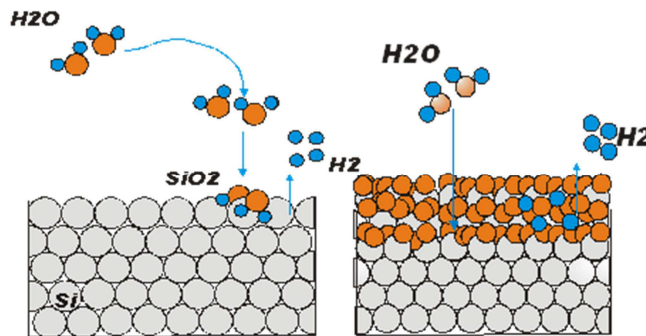


Figure 66 : Principe de la diffusion / réaction en surface, diffusion puis réaction

Le CVD est un procédé utilisé pour déposer des couches minces. La plaquette est exposée à un ou plusieurs précurseurs en phase gazeuse, qui réagissent et/ou se décomposent à la surface pour générer le dépôt désiré. Des réactions chimiques se déroulent au cours du processus après la formation d'un plasma à partir de ces gaz placés dans le réacteur. Le plasma est généralement créé à partir de ce gaz par radiofréquences, comme en gravure.

Les oxydes de champ (DFO) sont formés directement dans le silicium après des étapes de lithographie pour isoler électriquement chaque transistor de ses transistors adjacents.

Les oxydes d'isolation diélectriques sont déposés en couches pour isoler les transistors des couches d'interconnexion qui seront formées au-dessus.

Des oxydes de passivation sont ensuite déposés sur la surface de la plaquette finie pour la protéger contre les dommages lorsqu'elles sont manipulées et emballées. Les bornes du transistor à la fin de cette étape doivent être « à l'air libre » afin de s'assurer de leur raccordement au monde extérieur.

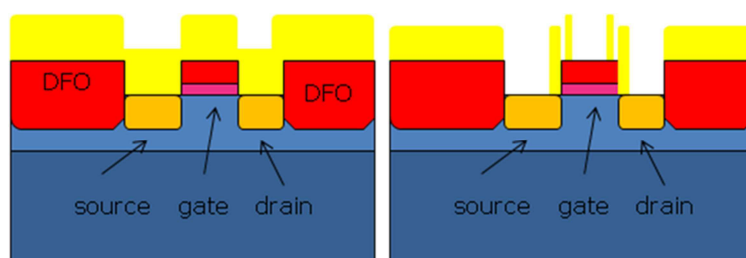


Figure 67 : Structure du transistor à la fin du FEOL

Pour le raccordement aux bornes du transistor, une couche d'aluminium est déposée sur la surface et dans les trous d'interconnexion. Une autre étape de masquage lithographique est effectuée pour masquer les zones qui doivent rester en aluminium, puis une gravure chimique du métal est effectuée pour enlever l'excès d'aluminium. Des zones de contact dans l'oxyde sont démasquées afin qu'elles puissent être gravées complètement jusqu'à la base du silicium et des trois bornes, source, drain et grille. Les contacts peuvent alors être connectés aux trois bornes du transistor. Ces trous, appelés vias, sont percés par gravure sèche. Une autre couche d'oxyde est

déposée sur le dessus de l'aluminium pour l'isoler électriquement des niveaux supérieurs (Figure 68).

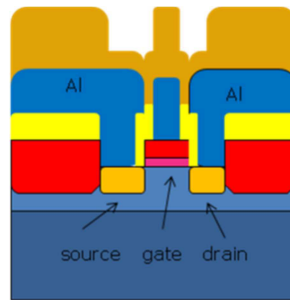


Figure 68 : Dépôt de couche d'une couche de métal, formation de vias et dépôt d'une couche oxyde diélectrique

Pour le dépôt des couches ultérieures et rendre la plaquette entièrement plane, il est souhaitable d'aplanir la plaquette. Le CMP (Chemical Mechanical Planarization) est un processus abrasif utilisé pour polir la surface de la plaquette (Figure 69). Il est utilisé sur les couches d'oxydes et de métaux. Elle implique l'utilisation de produits chimiques très spécifiques, les slurries.

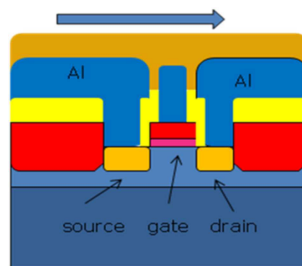


Figure 69 : Planarisation par CMP

Pour ajouter une ligne métallique supplémentaire à l'interconnexion, il est nécessaire de graver encore des vias. Ceux-ci sont ensuite remplis d'un métal, généralement de tungstène. Ces « bouchons », assurent la connexion électrique vers le bas entre deux couches de métal. Une fois le bouchon en place, la couche suivante de métal peuvent être déposée, masquée et gravée (Figure 70). Ce processus peut être répété jusqu'à 5 ou 6 fois pour des puces logiques complexes.

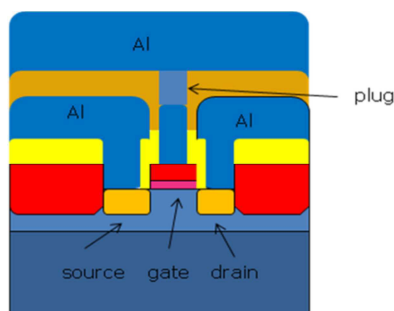


Figure 70 : Structure final d'un transistor CMOS

ANNEXE 1-B. Processus de production d'un boîtier

Les procédés décrits ici concernent les boîtiers dits « Ball Grid Array » (BGA), boîtiers sur lesquels nous avons principalement travaillé.

Fabrication du substrat

Le substrat sur les technologies BGA remplace le leadframe, un alliage de cuivre et d'un composé adhésif conducteur, qui faisait sur les générations plus anciennes la connexion entre le composant semi-conducteur et le circuit imprimé. Ce substrat est formé de différents matériaux tels que : résine BT, FR-4, FR-5, céramique, bande polyimide. Il possède des « pins » qui le relient au circuit. On utilise pour sa fabrication des techniques de photolithographie ou d'image laser directe. La fabrication est sous-traitée. Pour les substrats les plus avancés, les pistes mesurent environ 20µm et jusqu'à six couches de routage sont empilées sur une épaisseur de quelques centaines de micromètres: la difficulté réside dans l'utilisation de l'espace en 3 dimensions tout en conservant les performances électriques.

Prétraitement de la plaquette

Dès la réception de la plaquette dans la ligne assemblage, celle-ci doit être amincie, en éliminant le silicium de la face arrière. On appelle cette opération, le « back lap » ou « back grinding ». Cette opération est faite sur la plaquette entière avant la séparation des puces : cette opération, si elle était réalisée directement sur chaque puce, serait extrêmement coûteuse, voire impossible techniquement. Un film de polissage est appliqué sur la face avant puis une meule polit la face arrière. L'épaisseur est réduite de 75 à 90%, de 650 micromètres à 180, 170 ou 75 micromètres.

L'étape suivante consiste en la séparation des puces. Le sciage est la technique la plus répandue. Un film adhésif est placé sur la face arrière de la plaquette, lui-même fixé sur un support métallique ou plastique. Un système optique de reconnaissance oriente le support et sélectionne les bons paramètres de sciage. La plaquette est aspergée d'eau tandis qu'une scie métallique la découpe.

Connexions électriques

La connexion électrique de la puce au substrat peut se faire de deux manières : par une technique utilisant des pads de flip chip ou par une méthode de câblage filaire (Figure 71).

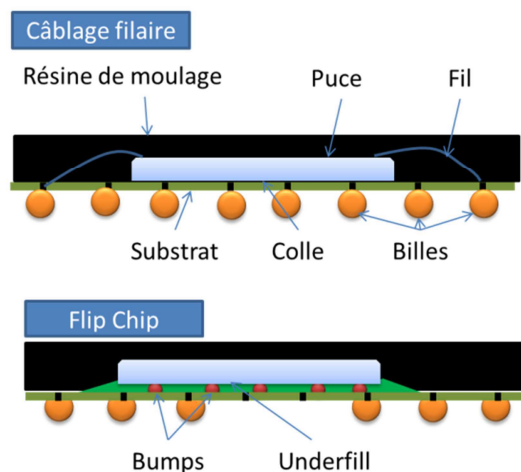


Figure 71 : Deux techniques de connexion d'une puce au boîtier

- Câblage filaire

La puce est collée au substrat. La méthode de collage la plus répandue est d'appliquer de la colle sur la face arrière de la puce. Cette colle peut contenir des particules d'argent si la jonction nécessite une connexion électrique. Ensuite la connexion de la puce se fait grâce à des fils, reliant les pads de la puce aux billes du substrat (Figure 72). Les pads sont des petites structures métalliques situées à proximité des bords. Les fils, très fins – de l'ordre de 20µm - sont en or, en aluminium ou en cuivre.

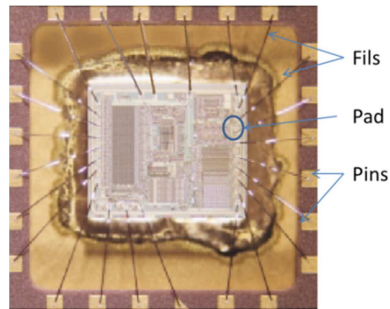


Figure 72 : Photographie d'une puce après ouverture du boîtier

- Flip chip

Cette technique était à l'origine réservée à des applications high-tech, mais depuis quelques années, un plus large éventail d'applications intègre cette technique. Le système une fois assemblé est beaucoup plus petit qu'un support traditionnel ; la puce se trouve directement sur la carte de circuit : la surface et l'épaisseur du boîtier sont réduites. Les distances de connexion fortement réduites permettent de réduire l'inductance, ce qui assure de transmettre des signaux à plus haute vitesse, et d'optimiser les transferts de chaleur. Cette technique a toutefois plusieurs inconvénients. Le produit final très plan et mal préhensible fait qu'on ne peut pas facilement le remplacer ou l'installer manuellement. En outre, les connexions sont très rigides, de sorte que la dilatation thermique de la puce doit être adaptée à la plaque de support, pour éviter les fissures.

Une étape additionnelle est réalisée sur la plaquette avant l'assemblage dans un boîtier flip chip : le bumping. Il s'agit de déposer sur chaque pad un petit plot d'un matériau conducteur, comme le cuivre : cela forme un « bump ». Ces bumps, situés sur la surface de la puce, assurent l'interconnexion directe, électrique, mécanique et thermique, entre le boîtier et la puce. Le dépôt d'un adhésif isolant électrique, l'underfill, permet d'assurer la liaison mécanique entre la puce et le substrat et fournit un pont de chaleur pour protéger les soudures, fortement sensibilisées par le différentiel de température entre la puce et le reste du système.

Moulage

La puce est ensuite encapsulée dans un boîtier en céramique, en verre ou en matière plastique. Le boîtier ne protège pas seulement la puce contre les chocs extérieurs, mais aussi rend l'ensemble du dispositif plus facile à manipuler. Ces boîtiers sont variés selon la puce elle-même ou l'application dans laquelle elle est utilisée. Le matériau de moulage est injecté dans des moules et se répand dans la surface prévue à cet effet; le matériau de moulage est polymérisé par un passage dans un four.

Soudure des billes

Les billes sont directement soudées sur le substrat. Le flux, une substance toxique, permet de souder les billes au boîtier. Le flux sera entièrement supprimé après son passage au four.

ANNEXE 2. Processus de conception détaillé d'un circuit

Spécification comportementale : du cahier des charges à la spécification fonctionnelle

Le point de départ, résultat de la phase de clarification, est le cahier des charges du circuit, définissant les propriétés du système et les contraintes. Il est transformé pour obtenir une spécification comportementale validée par une simulation fonctionnelle. La simulation fonctionnelle a pour but de vérifier les fonctionnalités du prototype par rapport à ce qui était envisagé dans le cahier des charges. Cette spécification comportementale est en fait un algorithme qui traduit les instructions de calcul et de contrôle du circuit à concevoir.

Synthèse comportementale : assemblage du circuit électrique

Le principe de cette synthèse comportementale est de produire, à partir de la spécification comportementale sous forme d'algorithme, un circuit sous forme d'interconnexion de cellules combinatoires, de registres, de bus et de circuits de commandes. Le designer sélectionne et assemble astucieusement des composants issus d'une bibliothèque de composants, appelée le design-kit.

Ce kit contient une description des fonctions élémentaires de chaque technologie et est donc spécifique à une technologie. En effet, selon les technologies, les caractéristiques et comportements des transistors au niveau « device » sont différents : vitesse, propriétés électrique, robustesse. Un transistor est caractérisé par :

- V_S : la tension de seuil ;
- I_{ON} , I_{OFF} : les courants en entrée et en sortie ;
- F_S : la fréquence de coupure qui caractérise la vitesse ;
- t_c : le temps de cyclage qui caractérise la robustesse.

De plus, les technologies ont des options différentes : différentes familles de transistors sont embarquées dans chaque technologie.

En premier lieu, le designer-kit réalise les fonctions élémentaires et les valide par la caractérisation électrique. Il utilise un modèle simplifié de cellules, permettant de reproduire le comportement au niveau transistor. Ensuite, il conçoit des cellules à des niveaux supérieurs :

- niveau « gate » : cellules standards (opérations logiques de base, I/O, points de mémoire)
- niveau « module » : IP pour Intellectual Properties. Ce sont des cellules complexes élaborées pour un objectif précis : les interfaces de gestion de protocoles normalisés ou des blocs capables de faire des opérations avancées (transformateurs, codage / décodage)
- niveau « circuit » : cellules complexes (convertisseurs analogiques ou numériques, PLL)

Les cellules entières sont stockées dans les bibliothèques sous forme de modèles lisibles par les outils automatiques au niveau appelé « transfert de registre » (RTL). Les bibliothèques contiennent une documentation complète et la caractérisation du comportement des unités standard, des blocs et des cellules. Pour être assemblés dans un système complexe, ces composants sont configurables

et on peut en compter quelques centaines de milliers par circuit intégré. L'objectif des designers-kit est de préparer l'utilisation de ces cellules pour une automatisation des flux de conception.

La conception électrique est alors entièrement basée sur un nombre limité des composants pris dans ces bibliothèques: résistances, condensateurs, inductances, diodes, transistors, etc. ou à un niveau supérieur hiérarchique sur les portes logiques.

Bien que la conception électrique se fasse par des moyens automatiques et l'utilisation de routine, les méthodes peuvent varier en fonction des délais et des coûts alloués à l'élaboration du système. La conception par analogie consiste à récupérer et réutiliser des éléments, en plus ou moins grand nombre, d'un circuit de la génération précédente. La stratégie de réutilisation peut être :

- cell-based : le concepteur réutilise uniquement les cellules de bases ;
- pre-diffused : il réutilise le layout ;
- pre-wired : réutilise tous les blocs ; un produit peut être facilement personnalisé selon les besoins des clients, en changeant uniquement la circuiterie (contacts et vias).

La réutilisation de cellules réduit l'effort de conception. Quand il n'existe pas de nécessité impérieuse pour le concepteur électrique de regarder à l'intérieur des boîtes de niveau inférieur, la complexité de conception est sensiblement réduite. Les temps de développement et donc les coûts sont réduits. Cependant, ces stratégies ne permettent pas d'optimiser la taille du circuit et donc le coût du produit . (Figure 73).

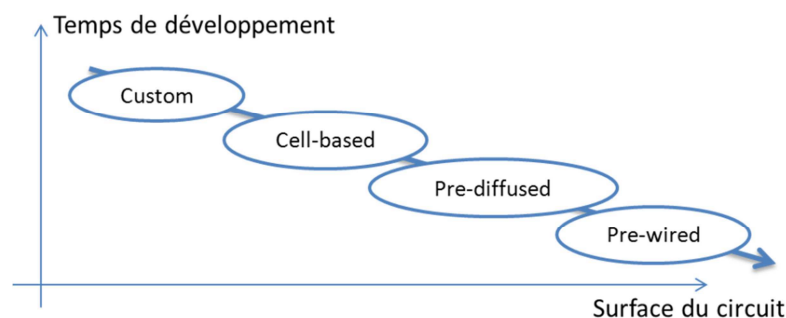


Figure 73: Lien entre temps de développement et surface du circuit selon les méthodes de conception

Synthèse logique

La conception logique est une étape du cycle de conception d'un circuit dans laquelle la conception fonctionnelle d'un circuit électronique est convertie dans une représentation qui intègre des opérations logiques, des opérations arithmétiques, etc. La synthèse logique est l'étape de conception qui transforme la description RTL en un réseau de portes logiques.

Aujourd'hui, une grande partie peut être automatisée en utilisant des outils de synthèse de haut niveau basés sur la description du comportement du circuit.

Conception Physique : Génération du Layout

La conception physique correspond aux étapes finales de la conception. Les résultats représentent l'implémentation pour obtenir le dessin des masques utiles à la fabrication du circuit. Les trois étapes principales sont le placement, le routage et la vérification du dessin physique (*layout*).

). Le layout, ou dessin de masque, est la représentation d'un circuit intégré en termes de formes géométriques planes qui correspondent à des motifs de couches métalliques, oxydes, ou de couches semi-conductrices qui forment les composants du circuit intégré.

Au vu de la taille du produit final et du nombre de transistors qui y sont intégré, le comportement du circuit intégré dépend grandement des positions et des interconnexions des formes géométriques. Le travail de l'ingénieur-layout est de mettre en forme, placer et relier tous les éléments qui composent une puce afin qu'ils respectent tous les critères typiques : performances, taille et fabricabilité. Le layout généré passe une série de contrôles dans un processus connu sous le nom de vérification physique. Les contrôles les plus courants dans ce processus de vérification sont : design rule checking (DRC), layout versus schematic (LVS), parasitic extraction, antenna rule checking, electrical rule checking (ERC).

Une fois les vérifications réalisées, les données sont traduites dans un format standard (GDSII) et sont envoyées à une fonderie. Le procédé d'envoi de ces données à la fonderie est appelé 'tapeout' car les données sont généralement envoyées sur une bande magnétique. La fonderie convertit les données dans un autre format et l'utilise pour fabriquer les masques photolithographiques.

L'utilisation du design-kit facilite la génération du layout. En effet le layout de portes logiques, des modules arithmétiques et de cellules mémoire est une entrée du design-kit. Toutes les cellules sont conçues avec des caractéristiques similaires, telles que la hauteur, et peuvent être manipulées facilement pour générer le layout.

Vérification des paramètres électriques

Une clé pour la conception de circuits est de structurer les données de conception pour vérifier facilement la fabricabilité (DRM) et le fonctionnement normal du composant (DRT et DRC). «Le Design for Test» a pour but de s'assurer dès les stades préliminaires de la conception que les tests du composant seront aisément réalisables mais aussi que les temps de test sont les plus courts possibles en vue d'améliorer la rentabilité en tout en respectant la qualité du produit final. Tout au long de la conception de circuits électriques, des tests de « caractérisation électrique » sont réalisés afin d'évaluer le produit selon les spécifications électriques données dans la fiche technique. Tous les paramètres électriques sont vérifiés à cette étape.

ANNEXE 3. Description des outils traditionnels en éco-conception

Les outils d'évaluation

Les méthodes matricielles sont des méthodes d'évaluation environnementales basées sur l'identification, éventuellement la quantification, des aspects environnementaux (énergie, matériaux, déchets, etc.) de chacune des phases du cycle de vie du produit. Les méthodes matricielles peuvent être qualitatives, comme la méthode ESQCV [AFNOR'98-a], semi-quantitatives ou quantitatives, la plus connue des matrices quantitatives étant la « MET matrix » [Brezet'97-a] qui focalise son évaluation sur les matériaux, l'énergie et les substances toxiques.

Les checklists sont des listes de questions qui permettent une analyse du produit selon ses caractéristiques fonctionnelles. Elles ne permettent pas de réaliser une évaluation au sens strict, mais elles ont l'avantage de « noter » de manière simple le produit de façon à créer un référentiel. Le but d'une checklist est de pouvoir comparer des solutions à ce référentiel. Cela en fait essentiellement des outils d'aide à la re-conception pour la qualité écologique des produits [Ventère'95]. « Fast five of Philips » [Meinders'97] est une checklist, où le concepteur doit répondre à des questions relativement simples concernant 5 critères : énergie, recyclabilité, présence de substances dangereuses, durabilité et maintenance, service. Cette checklist est remplie à des stades ponctuels du processus de conception et de développement d'un nouveau produit.

Les outils d'amélioration

Ces outils sont des outils classiques d'aide à la prise de décision et de choix de solutions de conception. Leur application dans ce cas a pour but d'améliorer spécifiquement les qualités environnementales du produit. Il s'agit par exemple de méthodes de créativité comme la méthode TRIZ appliquée à la recherche de solutions environnementales [Jones 00] ou encore de l'AMDEC utilisée pour établir les priorités environnementales [Oberender'01] ou du QFDE [Masui'01] [Sakao'01].

On trouve dans ces outils ceux qui intègrent des lignes directrices en conception. Les guidelines sont des outils de base pour l'amélioration environnementale des produits. Ils constituent le recueil des lignes directrices, règles générales et « universelles », pour l'écoconception. Bien que l'ensemble de ces règles soit défini et a priori non évolutif, il existe toutefois des méthodes différentes dans la façon de classer ces règles et de les hiérarchiser [Wimmer'01].

Les guides d'éco-conception regroupent les principes généraux de l'éco-conception et les règles de base pour mener à bien un projet de développement de produit intégrant des contraintes environnementales. Ces manuels sont des référentiels de bonnes pratiques établis sur des règles de l'art [ISO/TR14062] [Behrendt '97].

Les outils mixtes d'évaluation et d'amélioration

On retrouve dans cette catégorie les outils DfX, de « design for X ». Ces logiciels permettent d'évaluer le produit sur des aspects environnementaux ciblés, comme les matériaux et leur contenu énergétique, la possibilité de désassembler le produit en vue de le recycler, les coûts environnementaux. Le support logiciel en fait autant des outils d'évaluation que d'amélioration, même si leur portée reste limitée, du fait d'un objectif concentré. On trouve par exemple l'outil DfR

(Design for Recycling) de GaBi⁶¹. Les principales règles de DfX sont résumées dans les Tableau 55 et Tableau 56. Les initiatives DfX conduisent à des changements conséquents en conception avec l'élaboration des cahiers des charges qui visent à minimiser les impact du produit sur son cycle de vie.

Tableau 55 : Niveaux principaux de DfX

DFX	Signification	OBJECTIFS
DfEE	Design for Energy Efficiency	Réduire la consommation d'énergie pendant l'usage Faciliter le recours à une source d'énergie plus flexible
DfRem	Design for Remanufacturing	Suggérer l'utilisation de pièces réutilisables
DfD	Design for Disassembly	Promouvoir la réutilisation des composants Rendre le désassemblage plus rapide et moins cher Tendre à un désassemblage complet Favoriser le démantèlement par des outils simples Augmenter le taux de récupération de matériaux en permettant une séparation sélective des pièces et matériaux
DfR	Design for Recycling	Faciliter la récupération et la séparation des matériaux Utiliser des matériaux qui sont recyclables localement Faciliter l'identification des matériaux Sécuriser la mise en rebut des matières non recyclables Diminuer le nombre de matériaux dans un produit tout en maintenant la compatibilité avec les infrastructures de production existantes Augmenter le nombre de pièces ou sous-systèmes qui peuvent être facilement désassemblés ou réutilisés sans rénovation Utiliser des matériaux plus adaptables utilisables pour plusieurs applications

Tableau 56 : Niveaux secondaires de DfX

DFX	Meaning	OBJECTIFS
DfL	Design for Longevity	Rendre les produits plus robustes Retarder tout besoin de remplacement de pièces
DfMo	Design for Modularity	Rendre le produit modulable pour faciliter la maintenance -
DfURE	Design for use with renewable energy	Promouvoir des cycles d'utilisation utilisant des énergies renouvelables
DfZE	Design for Zero Emission	-
DfCN	Design for Carbon Neutrality	-
DfS	Design for Serviceability	Faciliter la réparation Faciliter le remplacement des pièces usées ou cassées
DfC	Design for Compliance	Faciliter et accélérer la mise en conformité avec les réglementations en vigueur Anticiper les futures législations
DfP	Design for Packaging	Minimiser l'emballage Repenser les modes d'approvisionnement et de transport
DfL	Design for Logistics	Utiliser des matériaux locaux Diminuer les flux de transport Arranger l'approvisionnement pour minimiser le transport
DfRM	Design for Use of recycled materials	-
DfRMV	Design for Reduced Material Variety	-
DfHM	Design for Healthy Materials	-
DfER	Design for Economic Recycling	Promouvoir le recyclage
DfWm	Design for Waste Minimization	-
DfDis	Design for Disposability	Sécuriser la mise en rebut
DfC	Design for Compostability	Favoriser le compost
DfER	Design for Energy Recovery	Sécuriser l'incinération

⁶¹ <http://www.gabi-software.com/software/gabi-software/gabi-dfx/benefits/design-for-recycling-dfr/>

ANNEXE 4. Retour d'expérience : suggestions d'amélioration des processus internes pour la réalisation d'ACV par un fabricant de composants microélectroniques

Bien que ce ne soit pas le propos central de cette thèse, nous nous proposons de donner des perspectives d'amélioration pour la réalisation d'ACV sur des produits microélectroniques depuis l'expérience acquise pendant les travaux. La mise en œuvre d'ACV s'est avérée complexe pour différentes raisons évoquées précédemment. Diverses initiatives des fabricants et de leurs fournisseurs pourraient contribuer à faciliter et fiabiliser les démarches. Les milieux académiques devraient pouvoir être intégrés à ces recherches pour valider les démarches d'un point de vue scientifique et réglementaire.

- Niveau usine : La collecte de données pour la phase de fabrication est très longue du fait de la complexité des processus mis en œuvre, même pour une usine possédant un système avancé de gestion de l'environnement. Le Tableau 57 présente des propositions d'amélioration.

Tableau 57 : Suggestions pour l'amélioration de l'inventaire du cycle de vie sur le site de production

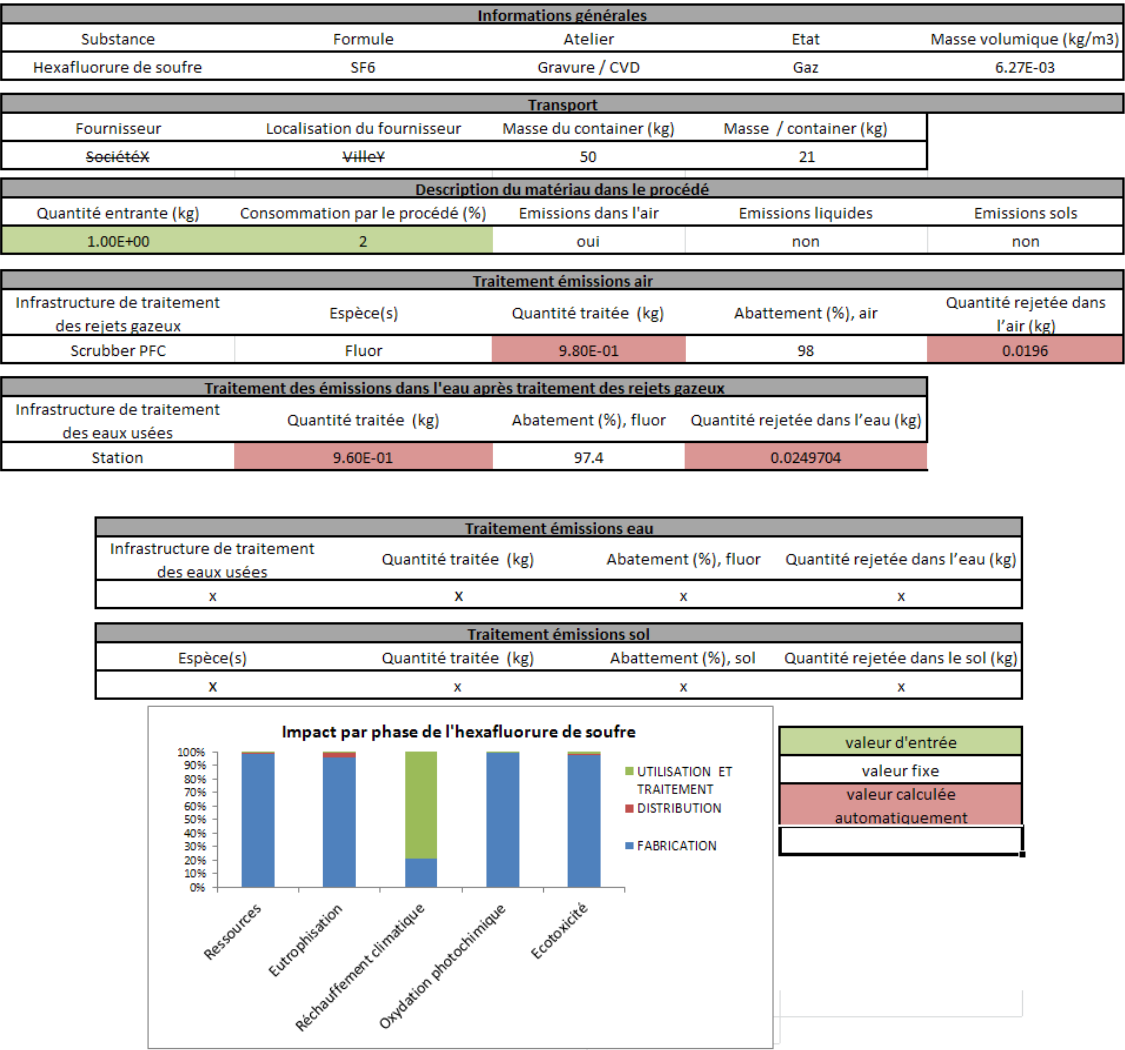
Données difficiles d'accès ou non inventoriées	Raison	Solution / Proposition d'amélioration
Difficultés d'ordre général	Diversité des outils et applications pour le contrôle des procédés	Regrouper le contenu des recettes de production dans des outils communs.
	Consommations suivies et gérées au niveau des facilités.	Augmenter la communication entre les équipes et établir des reportings réguliers
Consommables non liés au procédé et peu chers (azote, eau)	Les phases liées à l'ambiance des chambres de réaction, la stabilisation ou au nettoyage sont peu suivies.	Suivre les consommations liées à l'ensemble des phases de fabrication
Eau ultra-pure	L'eau est envoyée par jet. Les consignes sont binaires (ouverture et fermeture de vanne). Il n'existe aucune régulation en débit sur les vannes.	Mesurer les débits moyens des vannes d'eau
Gaz d'ambiance (hélium, oxygène, air comprimé)	Consigne en pression ou en température	Mesurer les débits moyens en fonction des consignes
Consommation par équipement pendant le fonctionnement.	Compteurs électriques situés au niveau des gaines à barres triphasées en sortie de transformateurs et non au niveau des équipements.	Lors de l'installation de nouveaux équipements, les puissances en utilisation sont mesurées et enregistrées, afin de connaître la consommation de l'équipement et de ses auxiliaires (pompes, scrubber) dans chaque mode de fonctionnement.

- Niveau organisationnel : la réalisation d'une ACV nécessite la contribution d'un grand nombre d'acteurs de l'entreprise qui pour la plupart ne sont pas sensibilisée
- s à ce type d'évaluation. Il s'agit donc d'obtenir l'engagement des parties prenantes. Trois changements d'organisation sont souhaitables :
 - la sensibilisation et la formation si nécessaire des acteurs ;
 - la nomination de personnes en R&D et production pourvoyant ou réunissant les données ;

- l’approbation par les fonctions hiérarchiques pour assurer le bon fonctionnement des projets.
- Niveau sectoriel : La définition de standards pour les indicateurs, comme nous l’avons réclamé par une publication, doit être associée à la création de standards pour les autres problématiques en ACV: ICV, méthodes d'évaluation, interprétation des résultats et publication. Ces standards permettront de comparer exactement les performances des produits issus de deux entreprises.

ANNEXE 5. Fiche descriptive d'un matériau : exemple de l'hexafluorure de soufre en gravure

L'exemple ici porte sur le gaz SF6 utilisé dans des procédés de gravure pour graver une couche de poly-silicium. L'ensemble de la chaîne de traitement est décrite, à la fois des émissions gazeuses puis aqueuses après les laveurs de gaz. L'ingénieur-procédé, utilisant la fiche environnementale ci-dessous, n'aura plus qu'à préciser le volume d'hexafluorure de soufre envoyé dans la chambre et le pourcentage théorique de gaz consommé par le procédé. Grâce à la fiche descriptive, l'impact des matériaux est calculé sur différents indicateurs de catégories et les phases du cycle de vie les plus contributrices sont mises en avant.



ANNEXE 6. Checklists

Checklist de développement de produit – *Green-STEP*

Checklist Green-STEP				Predecessor: IC1	New IC: IC2				Red Flag
				Name	Name				
				MATURITY 30	MATURITY 10	MATURITY 20	MATURITY 30	Date	
				15-11-10	25-11-12			Date	
Use Green Technologies	Eco-Pack level	x		2	3				1
	Bonding material	copper / gold		gold	copper				green
Decrease Size, Mass and Volume	Manufacturing centers certified according to the ISO14001	yes / no		yes	yes				0
	Number of components in product (BOM)	x		6	7				-1
Optimize Distribution Flows and Packing	Weight of product	mg		23	21				1
	Die size	mm ²		25	20				green
Design Energy-Efficient Circuit	Have you chosen the more advanced technologic node?	yes / no		yes	yes				1
	Number of dies per water	x		2300	2600				1
Imagine responsible products and applications	Recyclability of delivery packing	actions							
	Weight of delivery packing	g		30	35				-1
Think "Life Cycle"	Distance covered from gate to gate - product mass	km * kg		1500	18000				-1
	Power consumption of the product in each mode / IC	mW		3	2				1
	Number of low power modes / IC	x		3	3				1
	Energy consumption in standard use cycle	kWh		5	4				0
	Have you embedded power saving functions?	details							
	Is the product dedicated to a responsible application?	yes / no		yes	yes				1
	STAR Codification	x		1	2				1
	Ratio (Life span Application) / (Life span of product)	x		4	5				-1
	Has <i>Green-STEP</i> been used for the development?	yes / no		no	no				-1
	Have you made design choices relatively to environment perspectives?	details		no	no				0
	Carbon footprint of the product	kg CO2 eq		3	2.8				1
	Water footprint of the product	m3		4	5				red
	Resources footprint of the product	kg Sb eq		8.00E-03	7.50E-03				1
	Carbon footprint of manufacturing phase	kg CO2 eq		1.7	1.8				-1
	Carbon footprint of use phase	kg CO2 eq		1.2	4				-1
									red flags
									green flags
Global Environmental progresses compared to previous generation				yes / no					2
									4

Checklist de développement de technologies semi-conductrices- *Green-STREAM*

Checklist Green-STREAM			Predecessor	New Technology				Red Flag
			Name	MATURITY 5	MATURITY 10	MATURITY 20	MATURITY 30	
			Date	Date	Date	Date	Date	
Select Greener Materials	Compliance with RoHS	yes / no						-1
	Have you used materials classification list?	yes / no						0
	Supply material declaration	yes / no						0
Conceive Greener Technologies	Banned / Hazardous / Relevant substances	yes / no + details						0
	Plant certified ISO14001	yes / no						0
	Number of masks	x						0
	Number of poly levels	x						1
Decrease Size, Mass and Volume	Number of metal lines	x						0
	Die size	mm ²						green
	Number of dies per wafer	x						0
	Use of low power of ultra low power devices/options?							0
Think "Life Cycle"	Use of <i>Green-STREAM</i>	yes / no						0
	Initiatives to mitigate environmental impacts of products	yes / no + details						0
	Carbon footprint of the technology	kg CO2 eq						0
	Water footprint of the technology	m3						0
	Re sources footprint of the technology	kg Sb eq						0
	Eco-footprint of the technology	STPs						0
	Eco-footprint of the technology by complexity	STPs complex						1
								red flags 1
								green flags 4
Global Environmental progresses			yes / no					

Checklist de développement de boîtier- *Green-STAMP*

	Checklist Green-STREAM	Predecessor	New Package			Red Flag		
			P2					
			MATURITY 5	MATURITY 10	MATURITY 20			
		P1						
		MATURITY 30						
		Date	Date	Date	Date	Date		
Select Greener Materials	Compliance with RoHS Have you used materials classification list? Supply material declaration Banned / Hazardous / Relevant substances Plant certified ISO14001	yes / no yes / no yes / no yes / no + details	yes no yes no	yes yes yes no	Date Date Date Date	1 1 0 0	green green green green	
Conceive Greener Technologies	Number of manufacturing steps Number of balls Number of layers for substrate Bonding copper / gold	yes / no % % % copper / gold	yes 15 120 4 gold	yes 8 124 4 copper	yes 8 124 4 copper	Date Date Date Date	1 1 -1 0 1	green green green green green
Decrease Size, Mass and Volume	Package size Package thickness Pitch Package mass	mm ³ mm mm mg	36 1 0.5 25	25 0.8 0.2 12	25 0.8 0.2 12	Date Date Date Date	1 1 1 1	green green green green
Think "Life Cycle"	Use of <i>Green-STREAM</i> Initiatives to mitigate environmental impacts of package Carbon footprint of the package Water footprint of the package Re sources footprint of the package Eco-footprint of the package Eco-footprint of the package by complexity	yes / no yes / no + details kg CO2 eq m3 kg Sb eq STPs STPs complex	no no no no	no no no no	no no no no	Date Date Date Date	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
Global Environmental progresses		yes / no				red flags green flags	0 3	

ANNEXE 7. Intégration d'un système de gestion de l'environnement orienté-produit par le suivi des performances des produits

Différentes stratégies de conception peuvent être envisagées comme tout autant de pièces de l'éco-conception. Afin d'affirmer qu'un produit a été éco-conçu, des efforts importants sur chaque phase du cycle de vie doivent être démontrés. Il existe ainsi de nombreuses actions dont l'application en fait des stratégies et démarches concrètes d'éco-conception [Hemel'98] [Wimmer'01]: nous les avons listés sous la forme de « Green-X » où X est une phase de la conception ou une phase du cycle de vie. Le Tableau 58 liste les items retenus pour la microélectronique proposant une mesure des performances environnementales pour toutes les étapes du cycle de vie en fonction des paramètres de construction et de l'ingénieur concerné. Un indicateur correspondant à chaque item est proposé permettant de suivre les progrès d'un produit ou d'une famille de produits d'une génération à une autre ou au niveau de l'entreprise.

Tableau 58 : Green-X pour éco-concevoir un produit microélectronique

Green-X	Principe	Actions	Indicateur
Green-compliance	Rendre le produit conforme aux différentes législations environnementales	La conformité est en dehors du spectre de l'éco-conception. Cependant, l'anticipation de la législation ou l'application des textes les plus restrictifs au niveau mondial prouve l'engagement d'une entreprise.	Pourcentage de produits non-conformes aux législations en vigueur
Green-scalability	Limiter la consommation de ressources	Minimiser le poids et le volume du produit	Masse des matériaux utilisés par produit
Green-integration	Penser au concept du produit	Augmenter la robustesse et la durabilité des pièces ; Encourager les concepteurs à imaginer des solutions adaptées à l'application	x
Green-procurement	Réduire les impacts induits par l'approvisionnement des matières premières	Assurer l'engagement des fournisseurs pour la transparence dans la chaîne d'approvisionnement ; Sélectionner des moyens de transport peu polluants	Pourcentage de fournisseurs respectant une charte environnementale
Green-manufacturing	Trouver les meilleures solutions environnementales pour les technologies et les procédés	Diminuer la production de déchets Diminuer l'utilisation de ressources Ne pas produire de substances dangereuses Sélectionner des matériaux en fonction de critères environnementaux (direct et indirect)	Empreinte environnementale de la matérialisation d'un produit Nombre d'opérations / cm ² / pin
Green-efficiency	Concevoir des circuits énergétiquement efficaces	Concevoir des circuits énergétiquement efficaces ; Favoriser les fonctions qui sauvent de l'énergie	Consommation électrique en utilisation
Green-distribution	Optimiser l'emballage	Minimiser l'emballage ; Sélectionner des matériaux écologiques pour l'emballage	Masse et recyclabilité de l'emballage
Green-disposal	Diminuer l'impact de la fin de vie des produits	Augmenter la communication avec les recycleurs afin de connaître les filières de traitement des déchets électriques et électroniques (collecte, recyclage et réutilisation). Lister les matériaux selon leur potentiel de recyclabilité et risque de toxicité lors de l'incinération et de la mise en décharge	Pourcentage de la fin de vie sur l'empreinte environnementale de la matérialisation d'un produit